This is a digital copy of a book that was preserved for generations on library shelves before it was carefully scanned by Google as part of a project to make the world's books discoverable online.

It has survived long enough for the copyright to expire and the book to enter the public domain. A public domain book is one that was never subject to copyright or whose legal copyright term has expired. Whether a book is in the public domain may vary country to country. Public domain books are our gateways to the past, representing a wealth of history, culture and knowledge that's often difficult to discover.

Marks, notations and other marginalia present in the original volume will appear in this file - a reminder of this book's long journey from the publisher to a library and finally to you.

Usage guidelines

Google is proud to partner with libraries to digitize public domain materials and make them widely accessible. Public domain books belong to the public and we are merely their custodians. Nevertheless, this work is expensive, so in order to keep providing this resource, we have taken steps to prevent abuse by commercial parties, including placing technical restrictions on automated querying.

We also ask that you:

+ *Make non-commercial use of the files* We designed Google Book Search for use by individuals, and we request that you use these files for personal, non-commercial purposes.

+ *Refrain from automated querying* Do not send automated queries of any sort to Google's system: If you are conducting research on machine translation, optical character recognition or other areas where access to a large amount of text is helpful, please contact us. We encourage the use of public domain materials for these purposes and may be able to help.

+ *Maintain attribution* The Google "watermark" you see on each file is essential for informing people about this project and helping them find additional materials through Google Book Search. Please do not remove it.

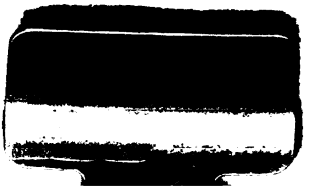
+ *Keep it legal* Whatever your use, remember that you are responsible for ensuring that what you are doing is legal. Do not assume that just because we believe a book is in the public domain for users in the United States, that the work is also in the public domain for users in other countries. Whether a book is still in copyright varies from country to country, and we can't offer guidance on whether any specific use of any specific book is allowed. Please do not assume that a book's appearance in Google Book Search means it can be used in any manner anywhere in the world. Copyright infringement liability can be quite severe.

About Google Book Search

Google's mission is to organize the world's information and to make it universally accessible and useful. Google Book Search helps readers discover the world's books while helping authors and publishers reach new audiences. You can search through the full text of this book on the web at `http://books.google.com/`

Digitized by Google

Library
of the
University of Wisconsin



Digitized by Google

Digitized by Google

Digitized by Google

MOTEURS A COLLECTEUR

A

COURANTS ALTERNATIFS

Digitized by Google

Digitized by Google

MOTEURS A COLLECTEUR

A

COURANTS ALTERNATIFS

PAR

le Dr F. NIETHAMMER

PROFESSEUR A L'ÉCOLE TECHNIQUE SUPÉRIEURE DE BRÜNN (AUTRICHE)

PARIS

EDITÉ PAR « *L'ÉCLAIRAGE ÉLECTRIQUE* »

40, RUE DES ÉCOLES, 40

—

1906

Digitized by Google

Digitized by Google

102726
JAN 2 1 1907
TOD
N55
6 9 19579

MOTEURS A COLLECTEUR A COURANTS ALTERNATIFS

CHAPITRE PREMIER

GÉNÉRALITÉS

Historique. — Différents types de moteurs monophasés à collecteur. — Moteurs polyphasés à collecteur. — Généralités sur les moteurs monophasés à collecteur.

HISTORIQUE

Les premières applications pratiques du moteur à collecteur, alimenté au moyen de courant alternatif, remontent à peu près à l'année 1880 ou même à une date antérieure. Avant l'invention et l'application générale des courants polyphasés, un certain nombre de maisons de construction se sont appliquées à perfectionner les moteurs monophasés à collecteur ; tels sont : la firme Ganz et C^ie^, et spécialement ses ingénieurs Blathy et Déri ; Siemens et Halske (1886) ; la Hélios Electricitäts Gesellschaft, de Cologne (Coerper) ; les Ateliers d'Oerlikon ; le Professeur Arnold et Eickemeyer avec l'aide de Steinmetz en Amérique (1) ; et enfin la Thomson-Houston C^o^ (Elihu Thomson, 1887). On doit à ce dernier ingénieur le moteur à répulsion, dont le rotor est court-circuité sur lui-même, et ne possède aucune liaison avec le réseau. Les recherches de toutes les autres maisons ont été surtout relatives aux moteurs série, c'est-à-dire aux moteurs dits de conduction, dont l'inducteur et l'induit sont reliés au réseau comme pour les moteurs à courant continu (2).

En 1888, Wilson prit en Angleterre le brevet n° 18.525 relatif à un moteur à collecteur diphasé dont le rotor avait quatre

(1) Cet auteur a donné, il y a plusieurs années, une théorie du moteur à collecteur dans son ouvrage : « *Alternating Current Phenomena* ».

(2) Le moteur à répulsion primitif possède des pôles saillants et non pas un enroulement réparti.

Digitized by Google

balais pour deux pôles. En 1890 et 1891, Görges (Siemens et Halske) expérimentait de son côté un moteur à collecteur triphasé que représente la figure 1 et qui fonctionnait aussi bien comme moteur série et comme moteur shunt. Sur ce moteur, on constata que, pour une position appropriée des balais, le facteur de puissance peut avoir pour valeur l'unité (compensation du décalage) et que, par un déplacement des balais vers l'avant ou vers l'arrière, on peut faire varier la vitesse dans de larges limites sans dissiper d'énergie dans des résistances. Le fonctionnement du collecteur comme transformateur de fréquence était ainsi nettement mis en évidence.

Les succès éclatants du moteur asynchrone polyphasé, apparaissant en 1890 sous sa forme la plus simple avec l'induit en court-circuit, détournèrent pendant un moment l'attention portée sur le moteur à collecteur : le collecteur et ses étincelles étaient considérés comme l'inconvénient inévitable des machines à courant continu, mais on désirait s'en débarrasser toutes les fois que cela était possible. Cependant Ganz et C°, Hélios, Schneider et C^ie^, Wagner et C^ie^, en Amérique, construisaient de petits moteurs d'ascenseurs monophasés à collecteur de 1/8 à 20 chevaux; il en était de même de la Société autrichienne Union qui exploitait une invention de Déri. La formation d'étincelles au collecteur créait de très sérieuses difficultés pour des moteurs plus puissants. Les moteurs mentionnés ci-dessus étaient établis de façon à démarrer comme moteurs série ou moteurs à répulsion et à fonctionner ensuite comme moteurs d'induction, le collecteur étant mis hors circuit. Il y a lieu de mentionner aussi le nom d'Atkinson en Angleterre : cet inventeur prit, en 1895 et 1898, toute une série de brevets de moteurs à collecteur, et dans une conférence faite aux « Ingénieurs Civils » en 1898, il a exposé un certain nombre de vues tout à fait modernes.

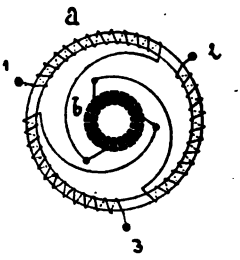


Fig. 1.

L'emploi de plus en plus répandu des moteurs asynchrones fit connaître leurs défauts et le revers de la médaille. Il suffit

Digitized by Google

de rappeler que les moteurs à induit en court-circuit présentent des inconvénients sérieux pour les fortes puissances, que la présence de trois bagues n'est pratiquement guère préférable à la présence d'un collecteur, qu'il n'existe pas de méthode pratique permettant de faire varier la vitesse des moteurs d'induction d'une manière avantageuse, etc. On s'aperçut donc vite que, pour la traction électrique et particulièrement sur les tramways, pour les appareils de levage, et pour toutes les applications où un grand couple de démarrage ainsi qu'une vitesse facilement variable sont nécessaires, le moteur asynchrone ne pouvait pas lutter contre le moteur à courant continu. En outre, le perfectionnement incessant des machines à courant continu fit tomber un certain nombre des appréhensions que l'on éprouvait à employer un collecteur.

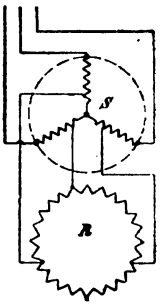


Fig. 2.

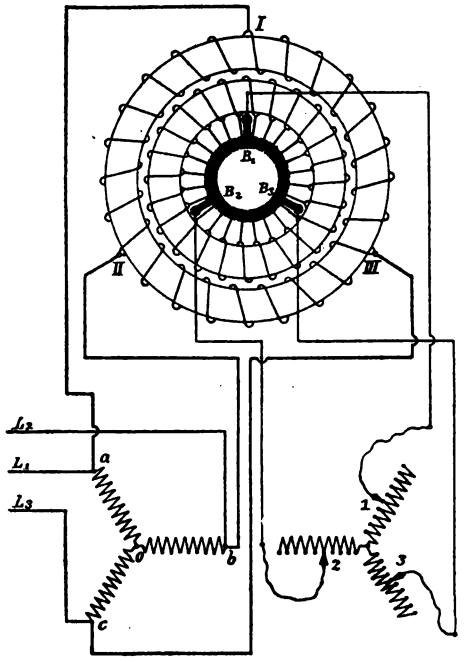


Fig. 3.

Heyland fut, en 1901, le premier qui revint, pour les courants alternatifs polyphasés, au moteur à collecteur : il n'obtint pas de succès pratique, car il employait uniquement le collecteur pour compenser le décalage dans les moteurs triphasés ($\cos\varphi=1$), et pour exciter et compounder les générateurs. Le collecteur avait été, d'ailleurs, employé auparavant en partie dans ce but par Leblanc, Boucherot et Latour, comme l'indique le schéma de la figure 2, où

Digitized by Google

le rotor R est un induit ordinaire de machine à courant continu.

En 1902, Winter-Eichberg, Sautter-Harlé et Cie et la Société Alsacienne de Constructions Mécaniques indiquèrent des méthodes rationnelles de réglage de la vitesse des moteurs polyphasés à collecteur (fig. 3) consistant à modifier, au moyen d'un transformateur de réglage *a c b*, la grandeur et la phase des tensions amenées au collecteur : en même temps, ces méthodes permettent de compenser le décalage.

Mais ces moteurs n'étaient pas encore aptes à fournir une bonne solution de la traction électrique sur voies ferrées, quoiqu'ils pussent avoir de l'avenir pour la commande de machines de levage ou de machines-outils ; en effet ils exigent au moins deux fils aériens et la terre comme conducteurs d'amenée du courant, ou, si l'on n'emploie pas la terre, trois fils aériens.

DIFFÉRENTS TYPES DE MOTEURS MONOPHASÉS A COLLECTEUR

L'époque actuelle qui voit éclore les applications du moteur à collecteur à la traction a été — tout au moins si l'on s'en rapporte aux publications — inaugurée en 1902 par la Cie Westinghouse (Lamme). Bientôt après, on apprenait les résultats d'expériences effectuées à Milan par le Dr Finzi, et on voyait la description d'un moteur compensé de l'Union E. G. (Winter-Eichberg) et de Latour. La General Electric Co, de son côté, poursuivait également des recherches sur les moteurs à répulsion.

La Cie Westinghouse, Finzi, et récemment la General Electric Co emploient le moteur série ordinaire : au contraire le moteur Winter-Eichberg est, pour parler brièvement, une combinaison du moteur série et du moteur à répulsion. Actuellement toutes les maisons de constructions importantes travaillent à la réalisation d'un moteur monophasé à collecteur qui soit pratiquement utilisable, se rattachant soit au type série, soit au type à répulsion, soit au type mixte.

Dans la dernière phase du développement de ces appareils, il faut mentionner aussi les moteurs à collecteur de Schüler (1902) et de Fynn. Le premier représente certainement la meilleure, combinaison d'un moteur à répulsion pour le démarrage avec

Digitized by Google

un moteur asynchrone pour la marche normale, le passage d'une marche à l'autre s'effectuant progressivement.

Parmi la grande quantité de combinaisons possibles et de dispositifs proposés, il y a lieu de distinguer tout d'abord quatre types de moteurs qui possèdent les propriétés des moteurs série à courant continu. Ce sont:

1° Le *moteur série simple* (fig. 4 et 5) possédant un induit à courant continu et un système inducteur qui peut être :

a) *soit à pôles saillants* (fig. 4) semblables à ceux d'une machine ordinaire dynamo-électrique à courant continu, mais avec du fer lamellé.

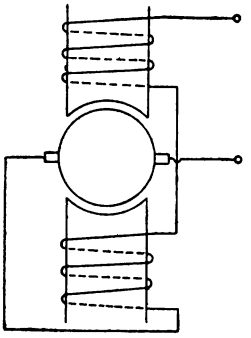


Fig. 4.

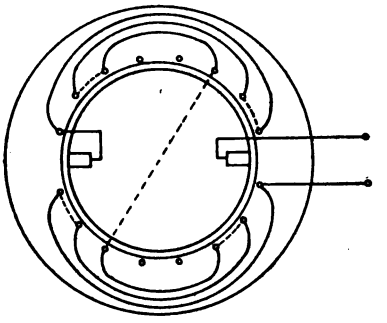


Fig. 5.

b) *soit avec des enroulements répartis* dans des encoches (fig. 5). Le système inducteur ressemble alors à l'enroulement statorique du moteur asynchrone monophasé ordinaire.

En général, le moteur série est muni, sur le stator, d'un enroulement de compensation perpendiculaire à l'enroulement inducteur normal (décalé d'un demi-pas polaire). Fréquemment, les connexions entre les lames du collecteur et les bobines de l'induit sont faites en métal de résistance électrique élevée. Différents dispositifs destinés à réduire la self-induction et la production d'étincelles au démarrage et en marche normale ont été également proposés.

2° Le *moteur à répulsion simple*, dont les balais sont en court-circuit direct. Les balais sont décalés d'un angle β

Digitized by Google

compris entre 75° et 45° par rapport à la zone neutre perpendiculaire à l'axe de l'enroulement. Le système inducteur comporte presque toujours un enroulement réparti. Le dispositif de la figure 7, dans lequel les balais non reliés ensemble couvrent un grand nombre de lames du collecteur, n'a qu'une maigre importance en pratique.

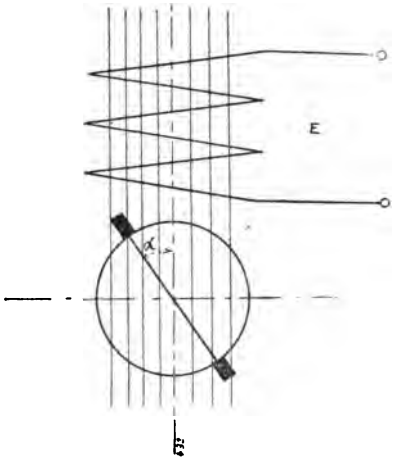


Fig. 6.

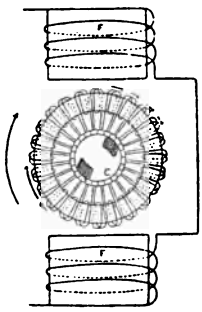


Fig. 7.

3° *Le moteur à répulsion compensé* ou, d'une façon générale, le moteur compensé de Latour (fig. 8), qui dérive du moteur à répulsion quand on sépare le plan des balais inclinés en deux plans perpendiculaires l'un à l'autre.

4° La combinaison du moteur 1 ou 3 avec un *transformateur* (fig. 9 et 10) permettant de faire varier à volonté le rapport entre la différence de potentiel aux bornes de l'inducteur et la différence de potentiel aux bornes de l'induit. Le dispositif représenté schématiquement par la figure 9 a été breveté

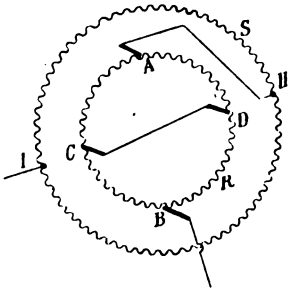


Fig. 8.

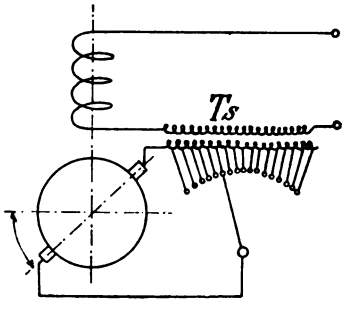


Fig. 9.

Digitized by Google

par Scott en 1903, et le dispositif de la figure 10 par Winter-Eichberg.

Comme on le verra sur le diagramme indiqué plus loin, les trois types : moteur à répulsion (fig. 6), moteur compensé sans transformateur série (fig. 8), et moteur compensé avec transformateur série sont à peu près identiques en principe et en théorie. Dans le premier type, le transformateur existe dans le moteur lui-même (stator-rotor) ; le second type ne possède pas d'action propre de transformation (1) ; le troisième type possède un transformateur extérieur au moteur et est, par suite, le plus parfait, puisque le rapport de transformation peut être modifié à volonté. Le mode de fonctionnement du moteur série est tout autre et plus simple en principe, mais moins parfait à plusieurs points de vue.

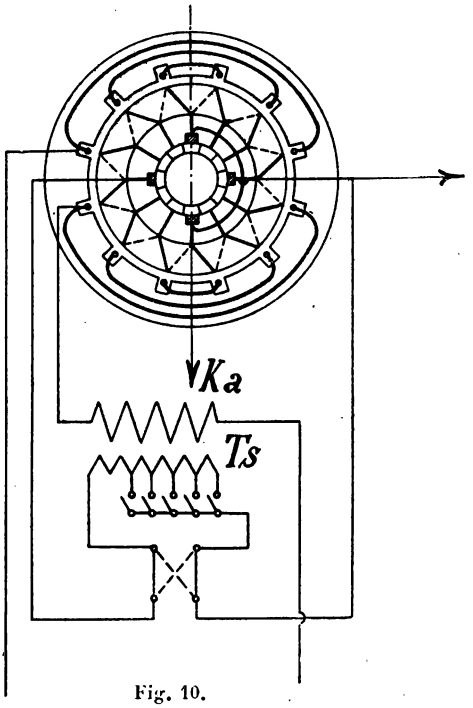


Fig. 10.

On a proposé fréquemment *des combinaisons* de *moteurs à collecteur* avec des *moteurs asynchrones* ordinaires, telles que le collecteur entre en fonction pour le démarrage et soit hors circuit pour la marche normale. Les moteurs monophasés de ces types se recommandent surtout pour des emplois à poste fixe, pour les ascenseurs et les machines outils par exemple, en comparaison des quatre types précédents qui possèdent les propriétés caractéristiques du moteur série à courant continu —

(1) Pour l'excitation transversale.

Digitized by Google

vitesse variable sous charge variable — et semblent tout indiqués pour la traction électrique et les appareils de levage.

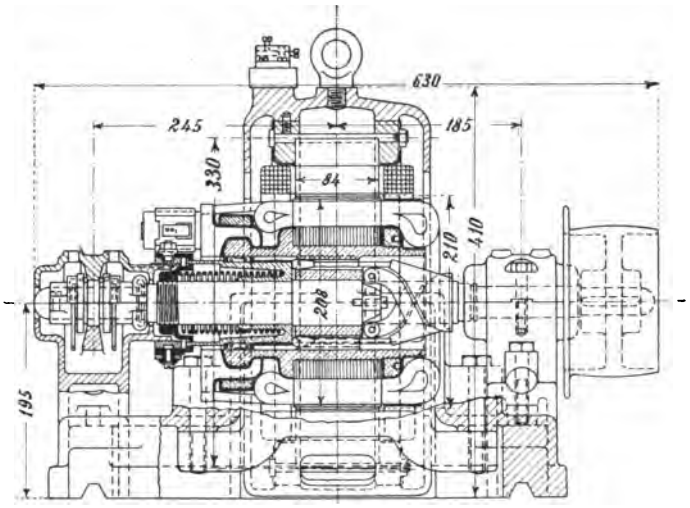


Fig. 11. — Moteur Wagner.

a) Le *moteur Wagner* (fig. 11 et 12) démarre comme moteur

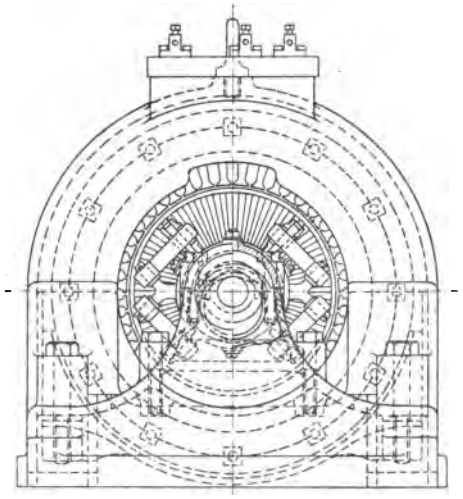


Fig. 12. — Moteur Wagner.

à répulsion : quand la vitesse a atteint une certaine fraction

Digitized by Google

de la vitesse de synchronisme, un régulateur à force centrifuge produit la mise en court-circuit de toutes les bobines de

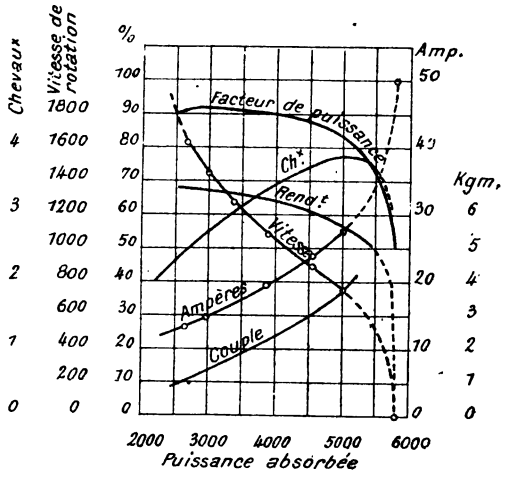


Fig. 13.

l'induit et le soulèvement des balais. Le collecteur est en

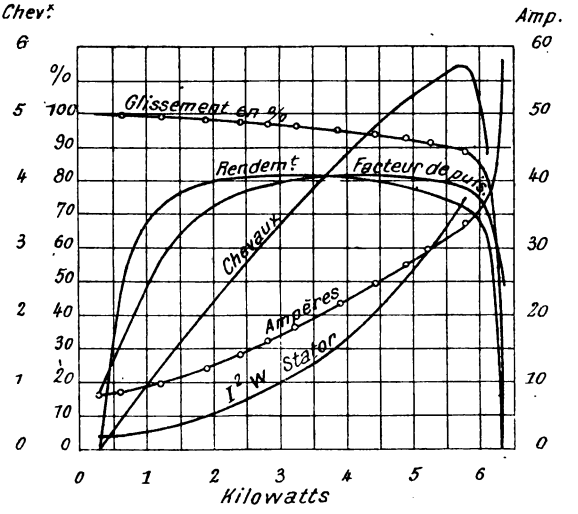


Fig. 14.

forme de disque. Généralement, une troisième borne placée sur le stator permet de n'employer que 90 % de l'enroulement,

Digitized by Google

ce qui augmente le couple d'environ 20 %. Le moteur représenté sur les figures 11 et 12 a une puissance de trois chevaux sous 220 volts à 1.500 tours.

Les conditions de fonctionnement de ce moteur sont indiquées par les courbes caractéristiques des figures 13 (moteur à

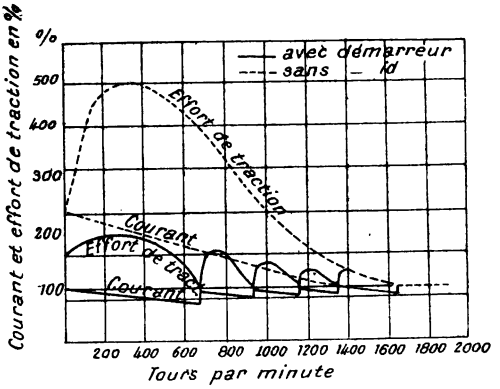


Fig. 15.

répulsion) et 14 (moteur asynchrone). La relation entre le couple de démarrage et la position des balais a été indiquée par l'auteur dans l'un de ses ouvrages (1). Le moteur Wagner

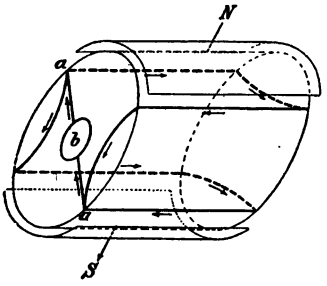


Fig. 16.

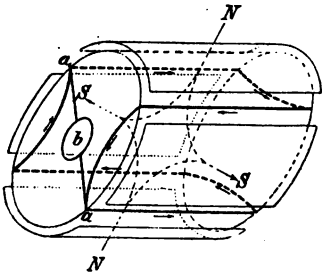


Fig. 17.

est aussi construit depuis peu avec des résistances non inductives dans l'induit, ce qui permet d'obtenir, pour une intensité de courant normale, un couple de démarrage égal à environ 1,5 fois le couple normal. La figure 15 indique les courbes de

(1) Niethammer : *Moderne Gesichtspunkte für den Entwurf elektrischer Maschinen* (page 147).

Digitized by Google

la période de démarrage avec démarreur (trait plein) et sans démarreur (pointillé). La valeur du facteur de puissance est,

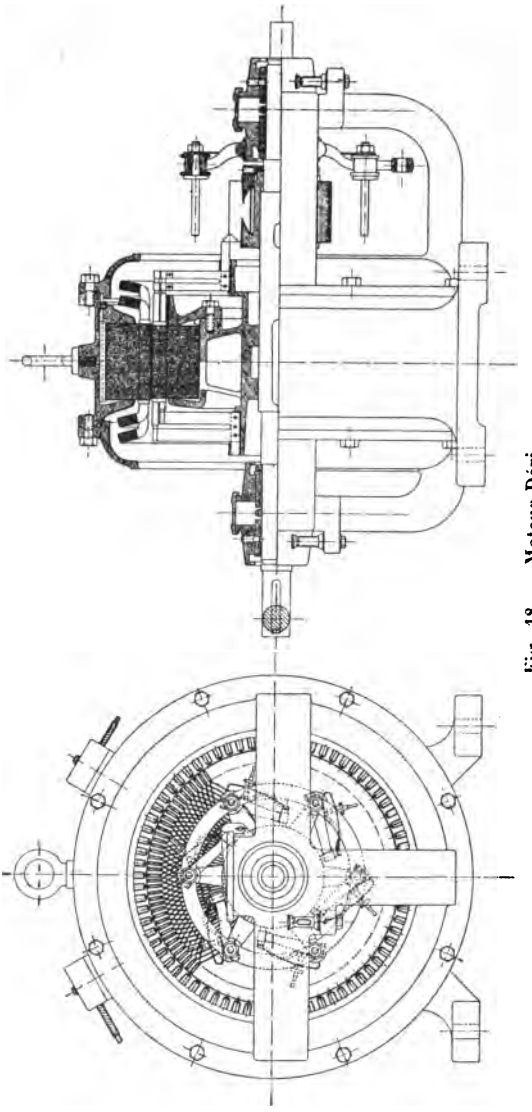


Fig. 18. — Moteur Déri.

dans ce cas, de 0,80 avant le démarrage ; elle monte à 0,95 pendant le démarrage et retombe ensuite à 0,85.

Digitized by Google

b) Le *moteur Déri*, de la C^ie^ autrichienne Union, est représenté par la figure 18 pour 10 chevaux à 750 tours. Le moteur démarre aussi comme moteur à répulsion et fonctionne normalement comme moteur asynchrone ; le changement est effectué sur le stator, un peu au delà du synchronisme, par modification du nombre de pôles soit à la main, soit au moyen d'un régulateur à force centrifuge.

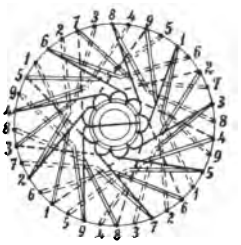


Fig. 19.

Le principe est facile à comprendre si l'on se reporte aux figures 16 et 17 : le démarrage est effectué, par exemple, avec le montage en bipolaire (fig. 16), les courants induits dans le rotor traversant les résistances *b* calculées de façon à obtenir le couple de démarrage maximum.

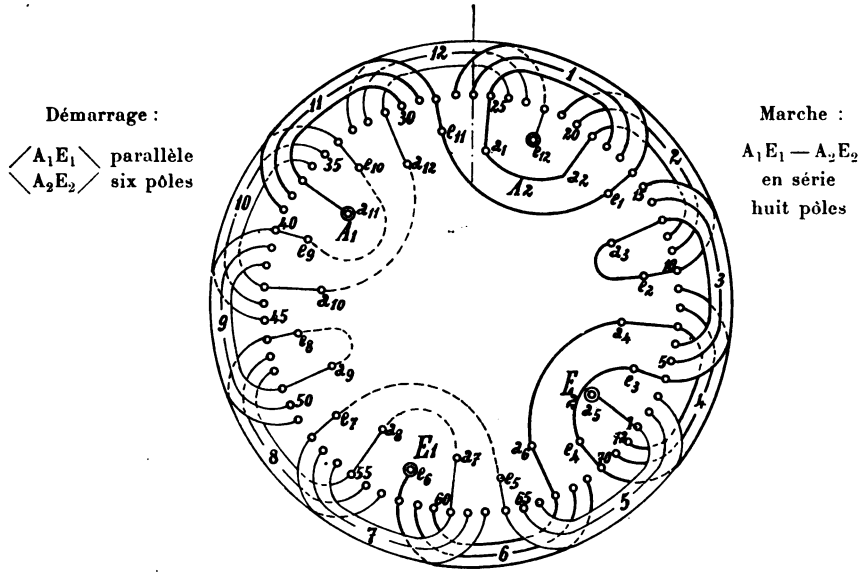


Fig. 20. — Enroulement Eichberg.

A la pleine vitesse, on passe au montage en tétrapolaire qu'indique la figure 17, et le courant secondaire ne passe plus par *b*. En réalité, *b* englobe aussi le collecteur, comme l'indique la figure 19 qui représente la connexion frontale d'un moteur

Digitized by Google

Déri. Les connexions longues, qui aboutissent au collecteur, ne sont parcourues par des courants qu'au démarrage ; pendant la marche normale, le courant du rotor ne passe que par la connexion courte en contournant le collecteur et le rotor devient un induit de moteur asynchrone en court-circuit. Parmi les moteurs construits, la plupart sont à six pôles au démarrage et à huit pôles en marche normale.

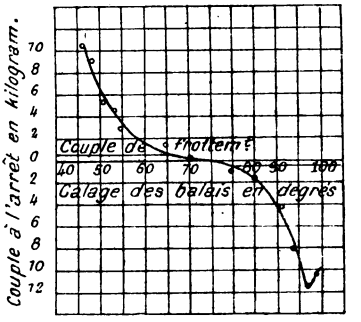


Fig. 21.

L'enroulement statorique imaginé par Eichberg et représenté par la figure 20 permet de faire toute la modification de montage par l'échange de quatre extrémités d'enroulement. Pour le démarrage, l'enroulement du stator est divisé en deux moitiés parallèles, afin d'augmenter le couple de démarrage par augmentation du flux ; pour la marche normale, on relie les deux moitiés A_1 E_1 A_2 E_2 en série. Pour inverser le sens de rotation, on déplace les balais d'un angle un peu inférieur au pas polaire. La variation du couple en fonction du calage de balais est indiquée par la courbe de la figure 21 pour un moteur Déri à six pôles.

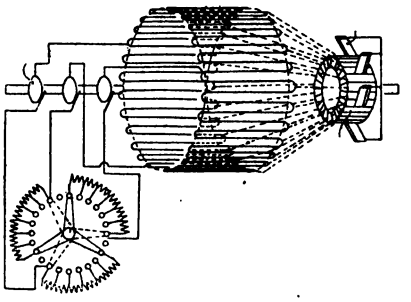


Fig. 22. — Moteur Schüler.

c) Le *moteur Schüler* est représenté par les figures 22 et 23 (pour six pôles). Le stator est semblable à celui d'un moteur asynchrone polyphasé ordinaire ; deux des phases du stator sont connectées en série et reliées au réseau (fig. 24). Le rotor possède un enroulement à courant continu aboutissant à un collecteur et à trois bagues. Le moteur démarre comme moteur à répulsion avec le montage de la figure 22, le circuit des bagues étant ouvert ou fermé sur des résistances de valeur élevée. A mesure que

Digitized by Google

la vitesse augmente, on diminue la valeur de cette résistance, et le moteur perd peu à peu la propriété du moteur à répulsion pour se transformer en moteur asynchrone : pendant la marche normale, les trois bagues sont court-circuitées.

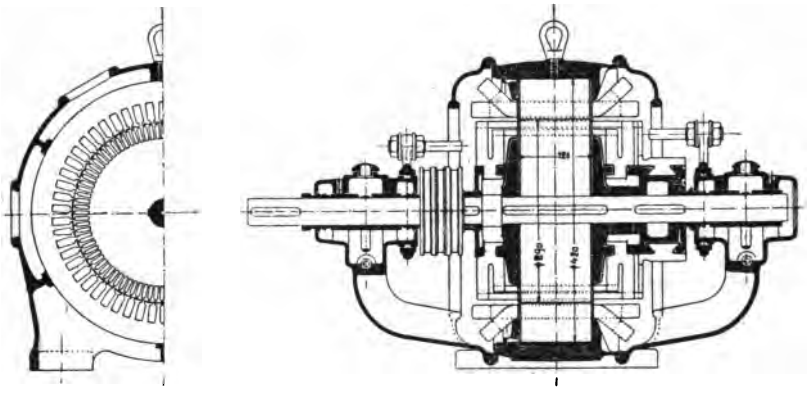


Fig. 23.

Les courbes de la figure 25 indiquent les valeurs du couple et de l'intensité du courant en fonction de la vitesse de rotation. Pour inverser le sens de rotation, on déplace les balais, ou bien l'on emploie deux lignes de balais décalées d'environ une demi-division polaire, en utilisant l'une ou l'autre d'entre elles suivant le sens de rotation : on peut aussi changer la phase de l'enroulement statorique comme l'indique la figure 24, ce qui a pour effet de déplacer l'axe du champ d'une demi-division polaire, mais ce qui exige l'emploi de 1/3 de cuivre en plus sur le stator. La Société *Lahmeyer* a indiqué dernièrement, pour des moteurs à sens de rotation variable, le montage de la figure 25_a dans lequel on emploie trois enroulements inducteurs F_1 f_1 f_2 dont les connexions relatives sont effectuées par le commutateur S.

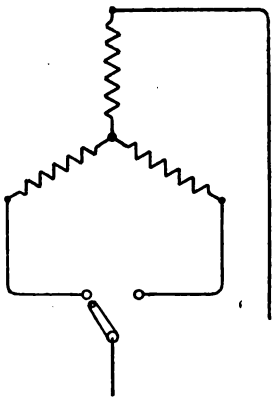


Fig. 24.

Fynn a imaginé, en 1902, un dispositif analogue à celui de

Digitized by Google

Schüler. Le moteur construit par la Société Alioth (fig. 26$_a$) possède un enroulement continu et un enroulement triphasé muni de trois bagues de prise de courant. Au démarrage, l'appareil se comporte comme un moteur à répulsion et le courant dans le rotor peut être réglé au moyen d'une résistance pour les moteurs de puissance supérieure à 5 chevaux. Quand la vitesse augmente, la résistance de démarrage est progressivement court-circuitée jusqu'à ce que le moteur fonctionne comme moteur d'induction sans collecteur. Le stator porte un enroulement triphasé dont deux phases seulement sont utilisées d'une manière permanente. Pour renverser

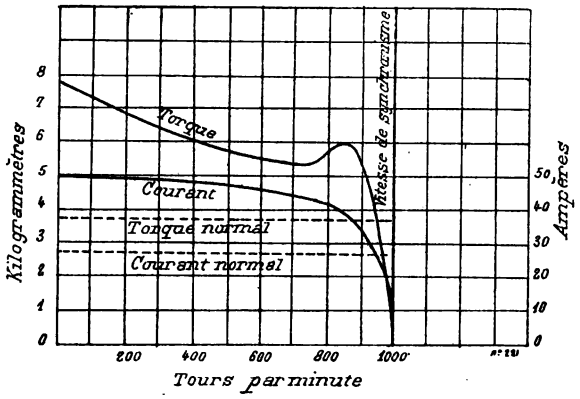


Fig. 25.

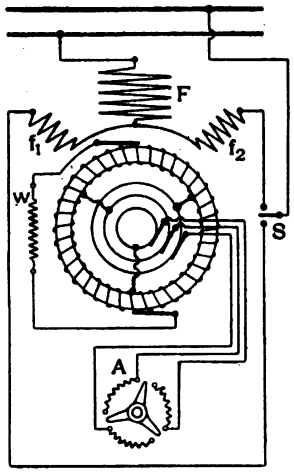


Fig. 25 *a*.

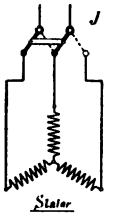


Fig. 26.

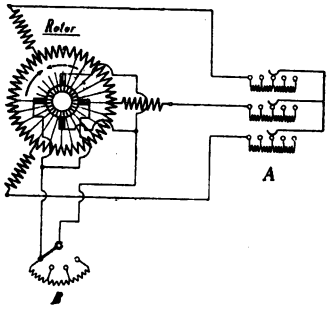


Fig. 26 *a*.

le sens de rotation, on emploie le commutateur J (fig. 26) qui change l'une des phases employées sur le stator.

Le rendement à pleine charge est de 70 % pour un moteur

Digitized by Google

de 1 cheval, et de 75 % pour un moteur de 10 chevaux : le facteur de puissance est de 74 % et 82 % pour ces deux moteurs : le courant de démarrage à couple double est environ 1,4 à 1,6 fois plus élevé que le courant normal. Si l'on emploie sur le stator un enroulement excitateur spécial décalé de 45° par rapport à l'enroulement principal et relié aux balais, on peut élever la valeur du facteur de puissance à 0,90 et plus, mais le rendement diminue.

Le *moteur shunt* monophasé à collecteur, qui possède un bon couple de démarrage mais un faible facteur de puissance, et dont la vitesse de rotation sous charge variable ne varie pas autant que celle du moteur série, n'a fait l'objet d'aucune application pratique. Son fonctionnement est, en principe, peu différent de celui des moteurs série et à répulsion (1). Quelques constructeurs étudient cependant l'emploi de moteurs monophasés dont l'induit est relié au réseau, parallèlement à l'inducteur, par l'intermédiaire d'un transformateur à rapport de transformation variable : c'est à ce type qu'appartient le nouveau moteur Lahmeyer, et celui de la Société d'Electricité Alioth. Le moteur shunt compensé ressemble au moteur fig. 8 et 10 avec la différence que l'inducteur III et l'induit AB (fig. 8) sont reliés en parallèle : ce moteur a une vitesse constante sous charge variable, mais un couple faible de démarrage.

MOTEURS POLYPHASÉS A COLLECTEUR

Les *moteurs polyphasés à collecteur* n'ont reçu jusqu'à présent que peu d'applications pratiques, d'une part parce que les moteurs d'induction polyphasés sont bien supérieurs aux moteurs d'induction monophasés, et d'autre part parce que les moteurs à collecteur monophasés offrent sur les moteurs polyphasés l'avantage de la simplicité. Il pourrait cependant se faire que, pour des appareils stationnaires, les

(1) A l'arrêt, le décalage entre le courant dans l'induit et la f. é. m. est grand, et le flux K est à peu près en phase avec le courant de l'induit J_a. Plus la vitesse augmente, et plus le décalage du courant diminue; plus alors augmente l'angle K,J_a : le couple diminue donc vite quand la vitesse augmente.

Digitized by Google

moteurs polyphasés à vitesse variable, tels que les construisent Winter-Eichberg, la Société Alsacienne et Sautter-Harlé, reçoivent quelques applications.

Le schéma d'un moteur Winter est donné sur la figure 3 : en faisant varier les trois tensions du rotor au moyen d'un transformateur de réglage, on peut faire varier la vitesse entre zéro et le synchronisme sans pertes dans des résistances, car la tension du rotor doit être à peu près proportionnelle au glissement.

Pour pouvoir abaisser suffisamment la vitesse et obtenir, en même temps, une valeur élevée du facteur de puissance, c'est-à-dire pour compenser le courant dé-watté, on est obligé de modifier les tensions du rotor non seulement en grandeur mais aussi en phase.

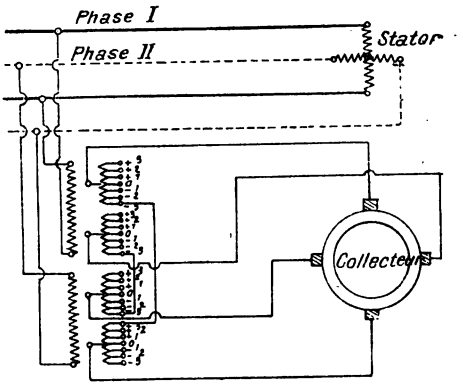


Fig. 27.

On peut y arriver soit en déplaçant les balais, soit en composant la tension du rotor avec des tensions variables en grandeur et décalées de 90° ou de 120° l'une sur l'autre (1). La figure 27 représente le montage d'un moteur diphasé de l'Union E.G.

On peut aussi employer un régulateur de potentiel construit comme un moteur triphasé, avec un transformateur à nombre de bobines variable. Aussitôt que l'on modifie, en grandeur et en phase, la tension du rotor, on peut obtenir, pour chaque vitesse de rotation, $\cos \varphi = I$. Il ne faut d'ailleurs pas perdre de

(1) Par exemple, si une phase du rotor se compose des vecteurs + E de la phase I et + E de la phase II, la tension résultante est $E\sqrt{2}$ décalée de $\alpha = 45°$ sur la phase I : si l'on compose au contraire $\frac{E}{4}$ de la phase I avec $\frac{E}{2}$ de la phase II, on obtient comme résultante $\frac{\sqrt{5}}{4} E = 0{,}56E$, décalée de $\alpha = 26\ 1/2$ par rapport à la phase I.

Digitized by Google

vue que l'emploi du collecteur complique ces moteurs polyphasés, et que le réglage en grandeur et en phase des tensions du rotor exige des transformateurs lourds et compliqués.

Pour les types de moteurs polyphasés à collecteur, il faut employer le montage en dérivation et non en série.

Le diagramme du moteur polyphasé, représentant assez exactement son fonctionnement, est donné par la figure 28. K_2 représente le flux magnétique dans le rotor, J_2 le courant du rotor par phase, $K''_s = C.J_2$ le flux de dispersion dans le rotor, K_e le flux dans l'entrefer : sur K_e sont portés le courant magnétisant J_μ et les ampère-tours correspondants A W pour la production de K_e, K_1 et K_2.

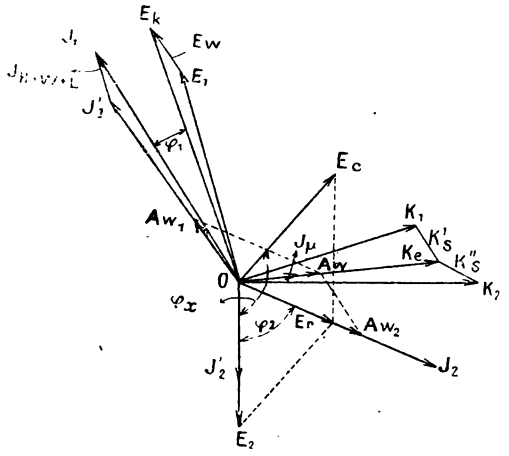


Fig. 28.

De $AW_2 = CJ_2$ et $AW = CJ_\mu$ résultent les ampère-tours primaires AW_1. Sur AW_1 est porté le courant primaire $J'_1 = \frac{AW_1}{C'}$: le flux de dispersion primaire $K'_s = CJ'_1$ est parallèle à J_1.

La force contre-électromotrice — E_k dans le stator est perpendiculaire à K_1. En ajoutant à E_1 la chute ohmique $E_w = J_1 w_1$ parallèle à J_1, et en ajoutant à J'_1 le courant des pertes J_{H+W+L} pour l'hystérésis, les courants de Foucault et les frottements, on obtient la différence de potentiel E_1 en avance de l'angle φ_1 sur le courant. E_2 est la force électromotrice induite dans le rotor et perpendiculaire à K_2 : E_c est la f. é. m. injectée au collecteur; les deux se composent suivant E_r qui produit le courant J_2 dans le rotor. S'il existe parallèlement au collecteur à l'intérieur du moteur d'autres circuits pour le courant (moteur Heyland), le courant

Digitized by Google

J'_2 passant dans ces circuits doit être ajouté géométriquement à J_2 (1).

La figure 29 représente encore un moteur avec collecteur triphasé dont le rotor est relié au stator triphasé par l'intermédiaire d'un régulateur de potentiel permettant de faire varier les tensions en grandeur et en phase, Un moteur de ce genre a été breveté en 1903 par la General Electric C° : pour le démarrage, ce moteur fonctionne comme un moteur série ordinaire.

Il est impossible d'indiquer ici tous les brevets relatifs aux moteurs monophasés : nous ajouterons seulement la description d'un nouveau moteur Crompton et Goldschmidt, breveté en Angleterre en novembre 1903, dont le principe a été, d'ailleurs, indiqué par E. Thomson.

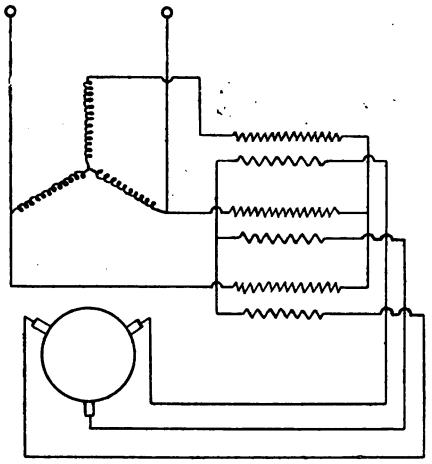


Fig. 29.

Le fonctionnement de ce moteur peut être expliqué de la façon suivante : supposons qu'une bobine plate mobile soit placée dans un champ alternatif bipolaire alimenté par le réseau et que ses extrémités soient reliées à deux lames de collecteur embrassant 90° de la périphérie et séparées par un segment isolant de 90°. Deux balais, calés à 180° l'un de l'autre et réunis en court-circuit, frottent sur ces lames : la position de ces balais est telle qu'ils quittent les lames métalliques au moment où le plan de la bobine mobile coïncide avec l'axe du champ alternatif, c'est-à-dire quand la bobine n'est le siège d'aucun courant. Les balais ne frottent sur les lames que pendant que le couple a un sens déterminé : pendant le temps où le couple serait

(1) En ce qui concerne ce diagramme, voir l'*Eclairage Electrique*, tome XL, 27 juillet 1904, page 10.

Digitized by Google

inversé, ils frottent sur les segments isolants. Pour obtenir une rotation continue, on emploie un grand nombre de bobines décalées les unes sur les autres, avec chacune deux lames dont l'épaisseur est égale au demi-pas polaire. La formation d'étincelles doit rendre ce moteur inapplicable.

GÉNÉRALITÉS SUR LES MOTEURS MONOPHASÉS A COLLECTEUR

Tous les *moteurs monophasés à collecteur* peuvent être construits de façon à développer un couple de démarrage puissant et à diminuer de vitesse quand le couple augmente. Le couple de démarrage est, d'ailleurs, le couple maximum. On peut régler la vitesse en modifiant la différence de potentiel aux bornes du moteur ou de l'induit : de même, on peut freiner par résistances ou par récupération, mais la première méthode entraîne des connexions plus compliquées que dans le cas du courant continu, et la seconde méthode est moins simple et moins efficace que dans le cas de moteurs triphasés ou de moteurs shunt à courant continu. Avec une construction rationnelle, on peut, pour la vitesse normale, atteindre toujours, dans les gros moteurs, $\cos \varphi = 0{,}9$; au démarrage, le facteur de puissance est très faible pour tous ces types de moteurs.

Le problème le plus difficile à résoudre est d'assurer au moteur une commutation sans étincelles dans toutes les circonstances et à toutes les charges. En effet, outre la tension de réactance qui existe dans les machines à courant continu, il y a dans les bobines court-circuitées d'autres f. é. m. produites par les différents flux alternatifs, exactement comme dans les bobines d'un transformateur.

Pour de faibles vitesses, c'est-à-dire peu de temps après le démarrage, la difficulté est à peu près la même dans tous les types imaginés : il s'agit, en principe, de surmonter les f. é. m. induites par les champs alternatifs, ce à quoi l'on peut parvenir en subdivisant considérablement le collecteur, en employant des balais étroits et en adoptant pour le flux une valeur assez faible. A proximité du synchronisme, le moteur à répulsion et le moteur compensé offrent des avantages, car les f. é. m. produites par la rotation dans les bobines court-circuitées et celles qui sont

Digitized by Google

induites par les champs alternatifs se neutralisent à peu près. Dans ces deux moteurs, il se produit un champ tournant elliptique qui, au synchronisme, se transforme en un champ tournant circulaire : alors disparaissent les champs alternatifs pulsatoires et, avec eux, les difficultés de la commutation.

Le renversement du sens de rotation est obtenu, comme dans les moteurs à courant continu, par inversion des connexions sur l'inducteur ou sur l'induit. Dans le moteur à répulsion, cette inversion présente parfois quelques difficultés (voir le moteur Schüler).

Tous les moteurs dont l'induit n'est pas directement connecté au réseau peuvent être bobinés directement pour haute tension, c'est-à-dire pour 3.000-6.000 volts. Le moteur série, au contraire, ne peut être établi que pour une différence de potentiel aux bornes de 200 volts environ. Le rendement du moteur à collecteur monophasé est inférieur de 2 à 10 % à celui des moteurs à courant continu de même puissance ; leur poids est un peu plus élevé.

Digitized by Google

Digitized by Google

CHAPITRE II

THÉORIE DE LA COMMUTATION ET DIAGRAMMES EXACTS DES MOTEURS MONOPHASÉS A COLLECTEUR

Diagramme général. — Couple. — Commutation et production d'étincelles. — Facteur de puissance. — Démarrage. — Réglage de la vitesse. — Freinage. — Pertes. — Commutation dans les différents moteurs.

I. — DIAGRAMME GÉNÉRAL

Nous allons établir d'une façon tout à fait générale la théorie des moteurs monophasés en nous appuyant sur les figures 30 et 31, sans tenir compte de ce que le moteur envisagé soit

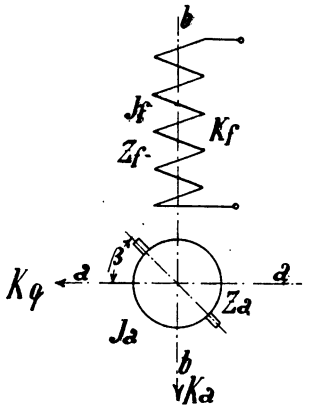


Fig. 30.

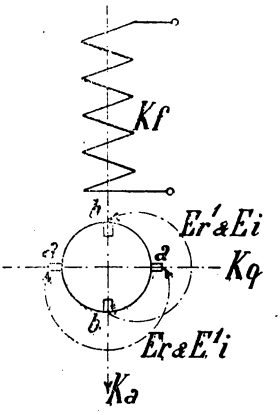


Fig. 31.

série, à répulsion, ou compensé : l'effet des bobines mises en court-circuit par les balais est négligé au début.

Supposons que l'induit (fig. 30) ait Z_a conducteurs effectifs, soit parcouru par le courant I_a, et présente une différence de potentiel E_a. Supposons que le système inducteur possède Z_f conducteurs, parcourus par le courant J_f. Si les balais sont décalés de l'angle β par rapport à la position neutre, les

Digitized by Google

ampère-tours AW_a de l'induit peuvent être décomposés en deux composantes $AW_q = AW_a \cos\beta$ (ampère-tours transversaux dans la direction *aa*) et $AW_g = AW_a \sin\beta$ (contre-ampère-tours dans la direction *bb*).

Les ampère-tours AW_g produisent dans l'induit, concurremment avec les ampère-tours du système inducteur, $AW = \frac{Z_f J_f}{4p}$, le flux K_a dirigé suivant *bb* : les ampère-tours AW_q produisent le flux transversal K_q.

Les deux flux rectangulaires, dont la figure 32 indique la position dans le temps, produisent dans l'induit les quatre f. é. m. suivantes, dont deux par induction statique comme dans un transformateur (E_i et E'_i), et deux par la rotation, comme dans un induit à courant continu (E_r et E'_r) :

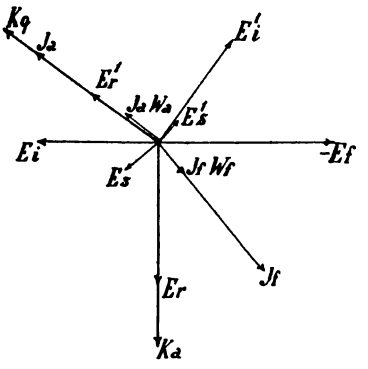


Fig. 32.

1°) Dans la direction de K_a, la f. é. m. E_r de rotation

$$E_r = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \frac{p}{a} \cdot \frac{u . Z_a . K_a . \cos\beta}{60 . 10^8}$$

$$= \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot n_r \cdot \frac{Z_a}{a} \cdot K_a . 10^{-8} . \cos\beta$$

$$E_r = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot n_r . Z'_a . K_a . 10^{-8} . \cos\beta$$

$2p$ désignant le nombre des pôles,
$2a$ le nombre des branches parallèles,
u la vitesse de rotation par minute (nombre de tours),
n la vitesse du champ tournant inducteur.

$n_r = \frac{pu}{60}$ la vitesse de rotation par seconde rapportée à deux pôles.

2°) Décalée de 90° en arrière de K_a, la f. é. m. induite E_i (1)

(1) Dans un transformateur, on a $E = 4{,}44 . n . z . K . 10^{-8}$.

Le nombre de tours est $z = \frac{Z}{4}$ car il y a deux moitiés d'induit en parallèle. Donc :

$$E = 1{,}11 . n . Z . K . 10^{-8}.$$

Mais, pour cette formule, on suppose l'enroulement concentré, tandis que, dans le moteur, il est réparti : il y a donc lieu de remplacer le facteur 1,11 par le facteur $\frac{2}{\pi}$ 1,11. Or : $2\frac{1.11}{\pi} = \frac{1}{\sqrt{2}}$.

Digitized by Google

$$E_i = \frac{1}{\sqrt{2}} . n . Z'_a . K_a . \sin\beta . 10^{-8}.$$

3°) Dans la direction de K_q, la f. é. m. E'_r de rotation

$$E'_r = \frac{1}{\sqrt{2}} n_r . Z'_a . K_q . \sin\beta . 10^{-8}.$$

4°) Perpendiculairement à K_q, la f. é. m. induite E'_i

$$E'_i = \frac{1}{\sqrt{2}} . n . Z'_a . K_q . \cos\beta . 10^{-8}.$$

Ces quatre forces électromotrices sont portées sur le diagramme de la figure 32 sur lequel sont portées en outre :

5°) La f. é. m. E_f de l'enroulement inducteur perpendiculaire à K_a ou K_f, en appelant K_f le flux dans l'enroulement inducteur

$$E_f = c . n . Z_f . K_f . 10^{-8},$$

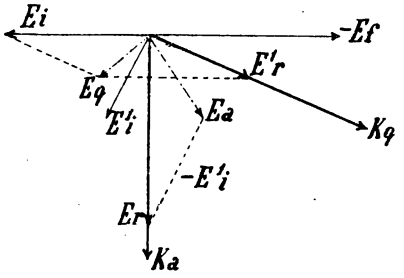


Fig. 33.

Z_f désignant le nombre total des conducteurs dans le champ (1), c'est-à-dire, pour des pôles saillants, $2p$ fois le double du nombre de tours par pôle. La constante d'enroulement c est égale à 2,2 pour des pôles saillants et est comprise entre 2,1 et 1,4 pour des enroulements répartis.

6°) Les tensions de dispersion produites par différents flux de dispersion : E_s perpendiculaire à J_f dans l'inducteur, et E'_s perpendiculaire à J_a dans l'induit. Leurs valeurs peuvent être calculées d'après les flux de dispersion correspondants que l'on détermine d'après les dimensions du moteur.

7°) Les chutes ohmiques $J_a w_a$ et $J_f w_f$ dans l'induit et dans l'inducteur, en phase avec J_a et J_f.

Dans le cas figuré par le schéma 31, les expressions de E_r, E'_r, E_i, E'_i ne contiennent pas les facteurs sin β et cos β

(1) Z_f est le nombre de conducteurs en série : si l'enroulement inducteur possède $2a$ branches parallèles et un nombre total de Z'_f conducteurs, il faut mettre $Z_f = \frac{Z'_f}{2a}$ dans l'équation pour E_f et AW_f.

Digitized by Google

qui disparaissent. Aux balais *aa* apparaît la somme géométrique E_a de

$$E_r = \frac{1}{\sqrt{2}} . n_r . Z'_a . K_a . 10^{-8}$$

$$\text{et } E'_i = \frac{1}{\sqrt{2}} . n . Z'_a . K_q . 10^{-8}.$$

Aux balais *bb*, la tension résultante se compose de

$$E'_r = \frac{1}{\sqrt{2}} . n_r . Z'_a . K_q . 10^{-8} \text{ et } E_i = \frac{1}{\sqrt{2}} . n . Z'_a . K_a . 10^{-8}.$$

Pour le *moteur série simple*, dont les balais sont sur la

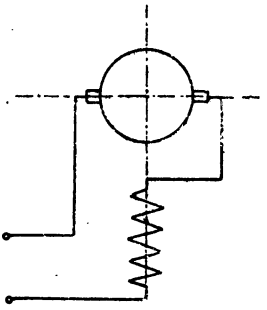


Fig. 34.

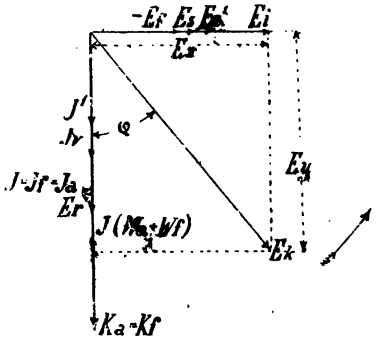


Fig. 35.

zone neutre (fig. 34), on peut employer le diagramme simplifié de la figure 35.

Le courant dans l'induit J_a est égal au courant dans l'inducteur $J_f = J$. Les tensions E_i et E'_r sont nulles. En ajoutant la f. é. m. E_r dans l'induit à la chute ohmique $J(w_a + w_f)$ dans l'inducteur et l'induit, on obtient E_y. Perpendiculairement à celle-ci, on porte la force contre-électromotrice $-E_f$ dans l'inducteur, augmentée des deux tensions de dispersion $E_s + E'_s$ dans l'induit et l'inducteur, puis de la tension induite E'_i. On obtient au total E_x. La différence de potentiel aux bornes E_k est alors la résultante de E_x et E_y :

$$E_k = \sqrt{E_x^2 + E_y^2}$$

et l'on a :

$$\cos \varphi = \frac{E_y}{E_k}$$

Digitized by Google

Pour que cos φ ait une valeur élevée, il faut que E_f, $E_s + E'_s$ et E'_i aient des valeurs faibles, en comparaison de

$$E_r + J(w_a + w_f).$$

Les tensions de dispersion $E_s + E'_s$ des enroulements induit et inducteur peuvent être maintenues très petites par un choix approprié des dimensions de l'induit et du fer de l'inducteur (1). La f. é. m. E'_i du flux transversal peut être considérablement réduite par l'emploi de fentes polaires dans le cas de pôles saillants (fig. 36, brevet allemand de Finzi, n° 143.208), ou, d'une façon générale, par l'emploi d'un enroulement décalé d'un demi-pas polaire par rapport à l'enroulement principal et court-circuité sur

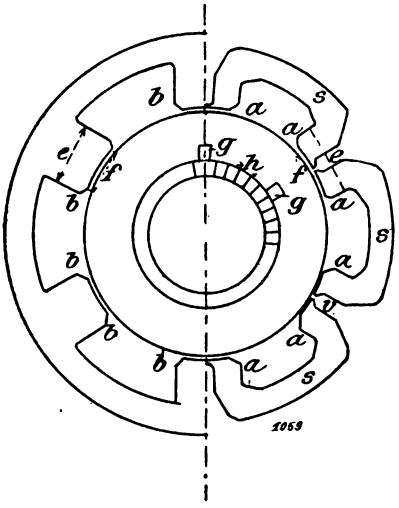


Fig. 36.

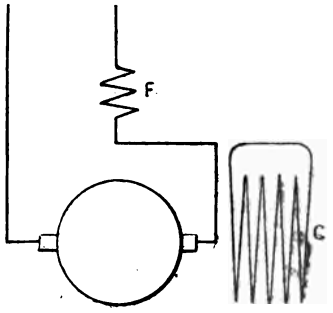


Fig. 37.

lui-même (fig. 37) : cet enroulement neutralise le flux transversal comme un transformateur court-circuité. Il peut également être en série avec l'enroulement induit (fig. 38 et 39). Quand on emploie sur le stator un enroulement réparti, on peut bobiner celui-ci en diphasé et employer une phase comme enroulement inducteur principal et l'autre phase comme enroulement compensateur.

Un dernier moyen pour augmenter la valeur de cos φ,

(1) En règle générale, E'_s a une valeur plus faible pour un enroulement réparti que pour des pôles saillants, mais E_i est beaucoup plus petit dans le cas de pôles saillants.

Digitized by Google

est de donner une faible valeur au rapport $\frac{E_f}{E_r}$, car, pour $E_s + E'_s + E'_l = 0$ et $J(w_a + w_f) = 0$, on a $\operatorname{tg}\varphi = \frac{E_f}{E_r}$.

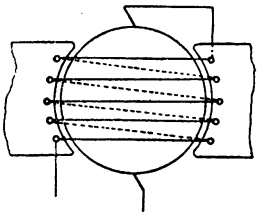


Fig. 38.

De plus, on a $\frac{E_f}{E_r} = k\frac{nZ_f}{n_r Z'_a} = k'\frac{n}{u}\frac{Z_f}{Z'_a}\cdot\frac{1}{p}$, c'est-à-dire que φ devient d'autant plus petit et cos φ d'autant plus grand que les rapports $\frac{n_r}{n}$ et $\frac{Z'_a}{Z_f}$ sont plus grands, et que le nombre de pôles $2p$ est plus petit pour un rapport $\frac{n}{u}$ donné ; cependant en diminuant p, il faut en général diminuer $\frac{Z_f}{Z'_a}$ en même temps.

On voit donc, puisque l'égalité $n = n_r$ correspond au synchronisme, que le facteur de puissance est d'autant meilleur que la vitesse du moteur par rapport au synchronisme est plus élevée et que, d'autre part, le nombre de tours de l'induit est plus considérable par rapport au nombre de tours de l'inducteur.

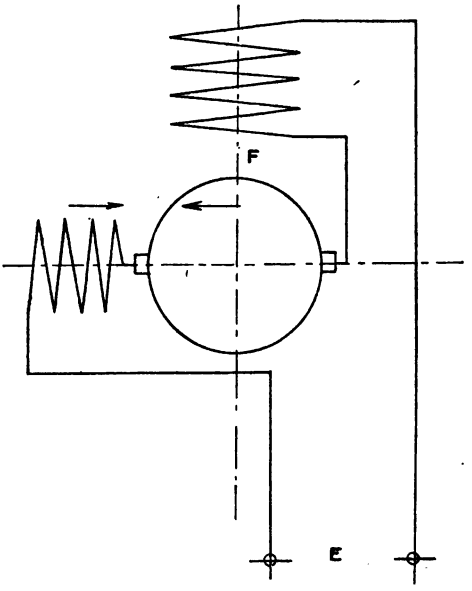


Fig. 39.

Comme la vitesse du moteur série va en augmentant quand la charge diminue, on voit que le facteur de puissance va en croissant quand le couple décroît, comme l'indique la figure 40 où les valeurs de cos φ sont portées en fonction des vitesses de rotation.

Si l'on suppose $kZ_f = Z'_a$ (en réalité, il est avantageux

Digitized by Google

d'avoir $kZ_f < Z'_a$), on a approximativement, au synchronisme :

$$E_f = E_r\,;\ \cos\varphi = 0{,}71.$$

Au double du synchronisme, on aurait $\operatorname{tg}\varphi = \frac{1}{2}$ et $\cos\varphi = 0{,}89$: au quintuple du synchronisme, on aurait $\operatorname{tg}\varphi = \frac{1}{5}$ et $\cos\varphi = 0{,}98$.

Comme on a approximativement : $c^{\mathrm{I}}.\frac{J.Z_f}{4.p}\,l = 0{,}8.B_l.\delta$, où B_l désigne l'induction dans l'entrefer et δ la valeur de l'entrefer, on a approximativement, pour la différence de potentiel aux

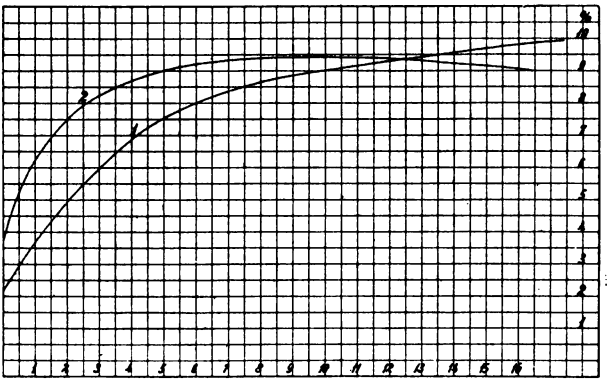


Fig. 40.

bornes, en appelant q_l la section de l'entrefer, $2p$ le nombre de pôles et D_l le diamètre extérieur de l'induit :

$$E_k = \sqrt{E_f^2 + E_r^2} = c^{\mathrm{II}}.K_a.\sqrt{(k.n.Z_f)^2 + (n_r.Z'_a)^2}$$

$$E_k = c^{\mathrm{II}}.B_l.q_l.\sqrt{(k.n.Z_f)^2 + (n_r.Z'_a)^2}$$

ou

$$E_k = c^{\mathrm{III}}\frac{n.J.Z_f^2}{4.p.\delta}.q.\sqrt{1 + \left(\frac{1}{k}\right)^2\left(\frac{n_r}{n}\right)^2\left(\frac{Z'_a}{Z_f}\right)^2}$$

$$= c^{\mathrm{IV}}\frac{n.J.Z_f^2}{p^2\delta}.D_l^2.\sqrt{1 + \left(\frac{1}{k}\right)^2\left(\frac{n_r}{n}\right)^2\left(\frac{Z'_a}{Z_f}\right)^2}.$$

Cette équation montre d'abord que, pour une différence de potentiel constante, la vitesse de rotation n_r diminue quand l'intensité de courant J augmente, et que cette vitesse n_r augmente avec la différence de potentiel aux bornes E_k. Le couple en kilogrammètres est :

Digitized by Google

$$M = \frac{E_r J}{9{,}81\,\frac{\pi . u}{30}} = \frac{\frac{1}{\sqrt{2}}\, n_r . Z'_a . K_a . J . 10^{-8}}{9{,}81 . \pi\,\frac{2 . n_r}{p}} = C . Z'_a . K_a . J . 10^{-6}.$$

Comme K_a est à peu près proportionnel à J et E_k, on peut écrire : $M = C' . J^2 = C' . K_a^2 = C'' . E_k^2$

On voit donc que le couple est approximativement égal au carré de la différence de potentiel aux bornes.

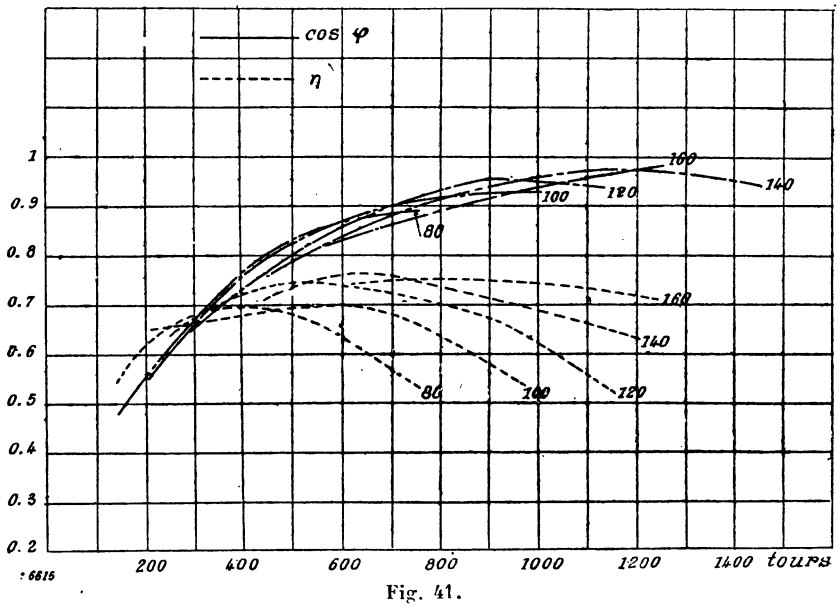


Fig. 41.

Les courbes relevées sur un moteur série Finzi de 27 chevaux pour traction sont représentées par les figures 41 et 42 pour une fréquence de 18 périodes par seconde.

Le diagramme exact du *moteur à répulsion* est directement développé sur les figures 43 et 44. Les deux conditions qui conduisent à ce diagramme sont les suivantes :

a) La somme géométrique des f. é. m. $E_r + E_i + E'_i + E'_r + E'_s$ et de $J_a w_a$ dans le rotor doit être nulle, celui-ci étant court-circuité sur lui-même. S'il est fermé sur une résistance exté-

Digitized by Google

rieure W, la somme ci-dessus doit être géométriquement égale à $J_a W$. L'angle φ_a compris entre J_a et entre la f. é. m. résultante de E_i, E_r, E'_r et E'_i est déterminé pour un moteur donné.

b) Les contre-ampère-tours AW_g et les ampère-tours inducteurs AW_f doivent avoir pour résultante les ampère-tours nécessaires à la production du flux K_a.

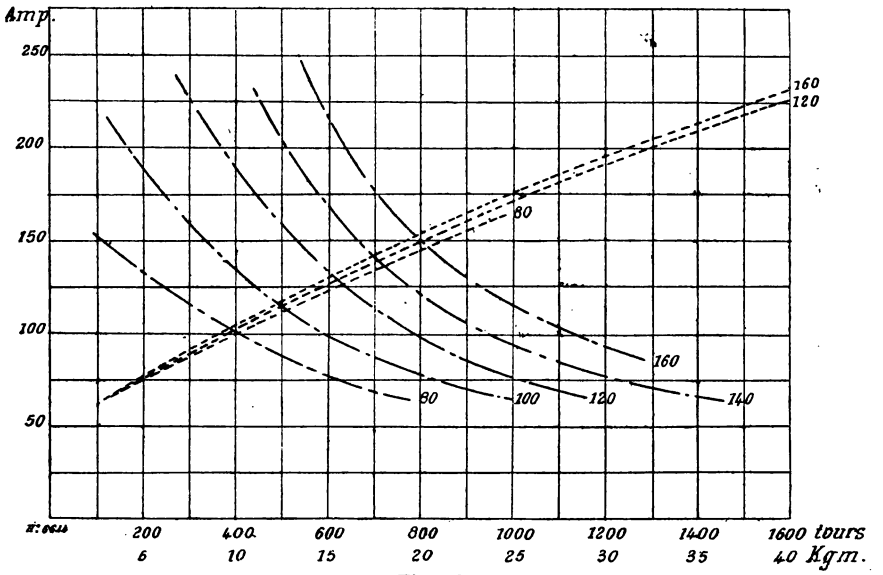


Fig. 42.

Mais on a : $$AW_g = \frac{J_a . Z'_a}{8.p} . k . \sin\beta = C . J_a ;$$

$$AW_f = \frac{J'_f . Z_f}{4.p} k' = C' J'_f \quad \text{et} \quad AW = \frac{J_\mu . Z_f}{4.p} . k = C' . J_\mu$$

où J_μ représente le courant magnétisant nécessaire, J'_f le courant primaire (sans pertes dans le fer et dans les paliers), k et k' les constantes d'enroulement égales ou supérieures à l'unité. On peut alors aussi dire, en supposant $C = C'$, que la résultante de J_a dans la direction de K_q et de J_μ dans la direction de K_a donne le courant primaire J'. On détermine J_μ d'après l'égalité $\frac{J_\mu . Z_f}{4.p} . k' = K_a W_m$, en appelant W_m la

Digitized by Google

réluctance magnétique offerte au flux K_a. On a approximativement $K_a W_m = 0{,}8 . B_l . \delta$. On ajoute J_v à J'_f pour les pertes dans le fer et par frottements, et on obtient le courant primaire total J_f. En ajoutant $J_f w_f$ et E_s à la f. é. m. E_f dans l'inducteur, on obtient la différence de potentiel aux bornes E_k.

L'existence de quatre f. é. m. dans l'induit, de même que l'existence du champ tournant $\frac{K_a}{K_q}$ dans l'induit distinguent le moteur à répulsion du moteur série. C'est, entre autres, la f. é. m. déwattée E'_r qui fait tourner, quand la vitesse augmente, le vecteur K_q ou J_a par rapport à K_a jusqu'à ce que, au syn-

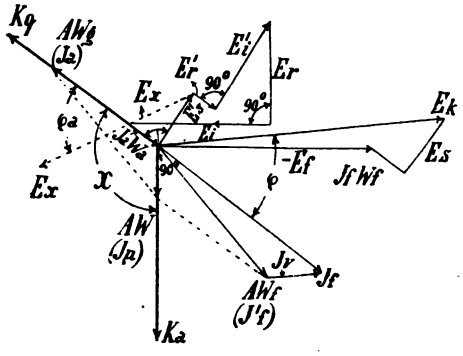


Fig. 43.

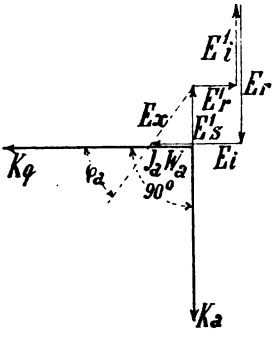


Fig. 44.

chronisme, l'angle $\widehat{K_a K_q} = x = 90°$ (fig. 44) et jusqu'à ce que cos φ atteigne un maximum : au synchronisme, on a donc, abstraction faite de la dispersion et de la chute ohmique :

$$E'_i - E_r = C\,(nK_q - n_r K_a) = 0,$$

car $K_q = K_a$, K_q est perpendiculaire à K_a, et $n = n_r$.

On a de même $E_i - E'_r = C\,(nK_a - n_r K_q) = 0$: la f. é. m. de réactance est donc compensée.

L'allure du facteur de puissance cos φ dans le moteur à répulsion à vitesse variable est sensiblement différente de celle que présente le moteur série, comme le montre la courbe 2 de la figure 40.

Pour les vitesses de rotation supérieures au synchronisme, le facteur de puissance du moteur à répulsion est meilleur que celui du moteur série : il atteint son maximum au voisinage du synchronisme et diminue ensuite, tandis que le

Digitized by Google

facteur de puissance du moteur série croît, avec la vitesse, encore au delà du synchronisme.

Dans le moteur à répulsion, il est également avantageux de maintenir petite la valeur du rapport des ampère-tours de l'induit aux ampère-tours de l'inducteur : ce rapport peut être modifié par changement de l'angle de calage β qui, pour l'obtention d'un bon facteur de puissance, doit être assez grand et compris entre 80° et 70°. De plus, le facteur de puissance maximum peut être amélioré si l'on réduit les tensions de dispersion E_s et E'_s et si l'on réduit le courant magnétisant J_μ ; c'est-à-dire qu'une diminution de l'entrefer améliore le facteur de puissance, comme c'est également le cas pour le moteur série.

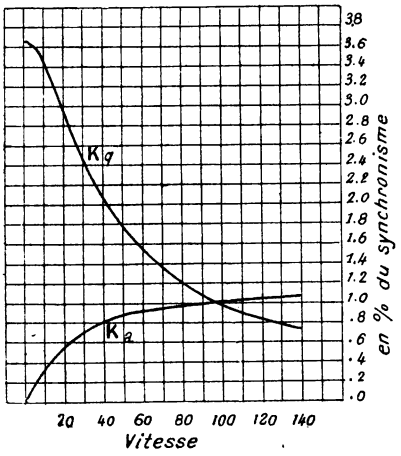


Fig. 45.

Un moteur à répulsion sans dispersion avec $J_\mu = 0$ aurait, au synchronisme, un facteur de puissance $\cos\varphi = 1$: en réalité, on obtient des valeurs de $\cos\varphi$ atteignant 0,9 et 0,95. La vitesse de rotation normale du moteur à répulsion n'a pas besoin d'être comprise entre 1,5 et 3 fois le synchronisme, comme pour le moteur série, mais il est avantageux de la maintenir voisine de la vitesse de synchronisme : ce type de moteurs est donc bien plus facile à construire pour des fréquences de 40 ou 60, tandis que l'emploi pratique des moteurs série est limité à des fréquences comprises entre 15 et 25 périodes (1). La formation progressive du champ tournant dans le moteur à répulsion est indiquée,

(1) Le moteur série s'approche d'autant plus du moteur à courant continu qu'on abaisse la fréquence, tandis que le moteur à répulsion, qui est un moteur d'induction, devient au-dessous d'une certaine fréquence (25) d'autant plus mauvais qu'on diminue davantage la fréquence.

Digitized by Google

d'après Steinmetz, sur la figure 45 pour $\beta = 74°$. A l'arrêt, on a $K_a = 0$ (transformateur en court-circuit) et K_q = maxi-

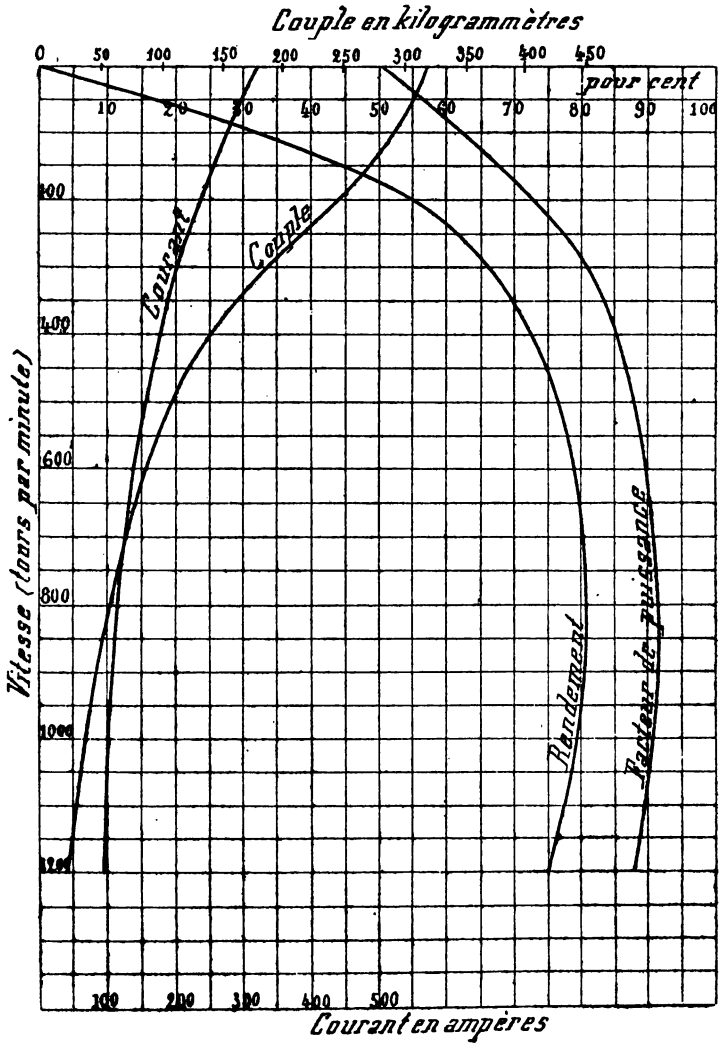


Fig. 46.

mum (J_a étant maximum). Quand la vitesse de rotation augmente, K_a augmente et K_q diminue. Au synchronisme, $K_a = K_q$; au delà du synchronisme, K_a est plus grand que K_q.

Digitized by Google

Les courbes d'un moteur à répulsion de 60 chevaux de la General Electric C°, construit pour 500 volts et 25 périodes, sont représentées par les figures 46 et 47. Dans cette dernière figure sont indiquées, à titre de comparaison, les courbes

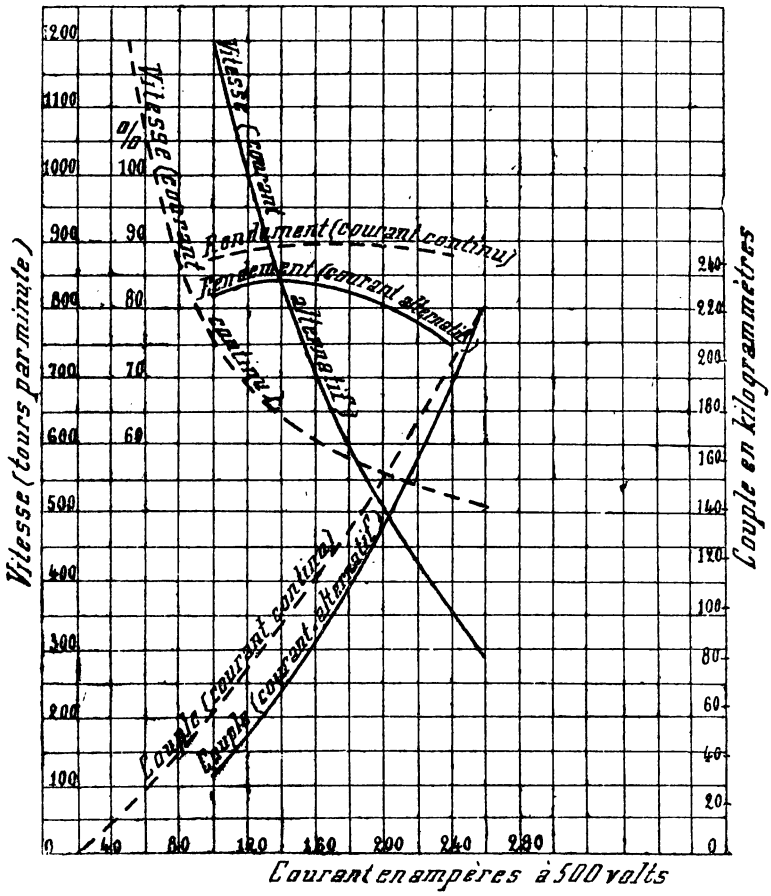


Fig. 47.

d'un moteur série à courant continu. Toutes ces courbes se rapportent à des moteurs de traction : la courbe de vitesse de rotation monte beaucoup plus rapidement dans le cas du moteur à répulsion.

Un moteur de 175 chevaux de la General Electric C°, construit pour 1.500 volts et pour une vitesse de marche de

Digitized by Google

m., a pour
20 km. à l'heure, et ayant un entrefer de 4 m $\eta_{max} = 0{,}85$,
facteur de puissance $\cos\varphi_{max} = 0{,}94$, et pour rendement
y compris les engrenages.

uissance
Brown-Boveri et C^ie ont pu obtenir un facteur de pu dépla-
de 0,95 dans leur moteur à répulsion à réglage par tions
cement des balais, grâce à un choix judicieux des propor
du moteur et de la fréquence employée.

té
Cramp (1) a indiqué que le moteur à répulsion, représen r
par la figure 7, ayant deux lignes de balais très larges pa
paire de pôles, a présenté, particulièrement avec des pôles
saillants, un fonctionnement au collecteur meilleur que celui
du moteur à répulsion ordinaire, car les bobines court-circuitées sont toutes en parallèle et non en série. L'inconvénient que la moitié des conducteurs environ est périodiquement inactive peut être compensé par l'emploi d'une densité de courant plus élevée.

Le diagramme du moteur compensé de la figure 48, sans transformateur série, peut être facilement déduit de celui du moteur à répulsion. La différence principale est seulement que, dans le moteur à répulsion, le champ transversal K_q est en phase avec le courant dans l'induit J_a, tandis qu'ici, il coïncide avec le courant inducteur J_f. Supposons qu'il circule dans l'induit deux courants complètement séparés, le courant inducteur J_f passant par les balais d'excitation *aa* et le courant induit J_a passant par les balais court-circuités *bb*. On peut encore distinguer deux sortes d'ampère-tours dans l'induit :

a) Les contre-ampère-tours $AW_g = \frac{J'_a . Z_a}{8 . a . p} k$

b) Les ampère-tours transversaux $AW_q = \frac{J_f . Z_a}{8 . a . p} k$.

La valeur du coefficient k est comprise entre 0,7 et 1. Les ampère-tours produisent à nouveau les deux flux K_a et K_q (fig. 48), qui, d'ailleurs, sont placés un peu différemment dans l'espace que dans le cas du moteur à répulsion. Il existe également encore quatre f. é. m. E_r, E_i, E'_r et E'_i dans l'induit :

(1) *Electrical Review*, 1903.

Digitized by Google

dans leurs formules, les facteurs $\cos\varphi$ et $\sin\varphi$ disparaissent et l'on a :

$$E_r = \frac{1}{\sqrt{2}} . n_r . Z'_a . K_a . 10^{-8}; \qquad E_i = \frac{1}{\sqrt{2}} . n . Z'_a . K_a . 10^{-8};$$

$$E'_r = \frac{1}{\sqrt{2}} . n_r . Z'_a . K_q . 10^{-8}; \qquad E'_i = \frac{1}{\sqrt{2}} . n . Z'_a . K_q . 10^{-8}.$$

Les deux grandeurs E'_r et E_i se composent en E_q, différence de potentiel entre les balais *bb* qui produit, après avoir surmonté la tension de dispersion de l'induit E''_s et la chute ohmique $J'_a w_a$, le courant J'_a (fig. 48) ; entre les balais *aa* apparaît la résultante E_a des tensions E_r et E'_i (fig. 33). La résultante des tensions E_r, E'_i, de la f. é. m. dans l'inducteur $E_f = c.n.Z.K_f . 10^{-8}$, et de la chute ohmique dans l'inducteur et l'induit $J_f(w_f + w_a)$, ainsi que des tensions de dispersion E_s et E'_s dans l'inducteur et l'induit, donne la différence de potentiel aux bornes.

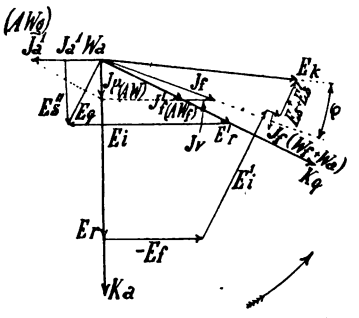


Fig. 48.

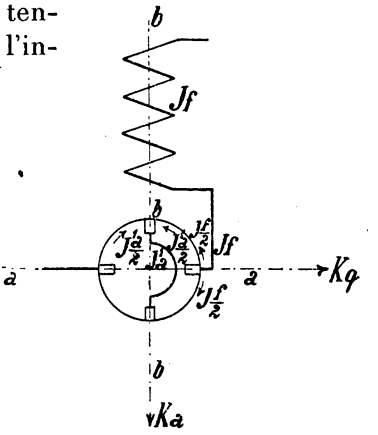


Fig. 49.

Le courant dans l'induit $J'_a = \frac{AW_g}{C}$ se compose avec le courant magnétisant $J_\mu = \frac{AW}{C'}$ pour donner le courant primaire $J'_f = \frac{AW_f}{C'}$ (1).

Les ampère-tours nécessaires pour la production du flux K_a sont : $AW = C' . J_\mu = 0{,}8 . B_l . \delta$.

(1) Les notations C, C', B_l, δ ont la même signification que précédemment, pour le moteur à répulsion.

Digitized by Google

Pour obtenir le courant J_f pris au réseau, il faut ajouter à J'_f le courant de pertes J_v correspondant aux pertes dans le fer et aux pertes par frottements : l'angle de décalage φ entre E_k et J_f est ainsi déterminé. Contrairement au cas du moteur à répulsion, il se produit, pour une certaine charge et une certaine vitesse (synchronisme), un cas où $\cos \varphi = 1$. Au synchronisme, il y a, comme dans le moteur à répulsion, compensation entre E_i et E'_r, de même qu'entre E'_i et E_r, car $n = n_r$, $K_a = K_q$ et K_a est perpendiculaire à K_q.

Si l'on alimente l'induit d'un moteur compensé par l'intermédiaire d'un transformateur série, le diagramme de la figure 48 n'est pas changé. Il suffit de se rappeler que les valeurs de E'_i et E_r peuvent être modifiées, et d'écrire, au lieu de E'_i et E_r, les valeurs $\lambda E'_i$ et λE_r, λ désignant le rapport de transformation du transformateur. A chacune des nombreuses valeurs de λ correspondent une charge et une vitesse [1] déterminée, pour lesquelles $\cos \varphi = 1$, c'est-à-dire que l'on peut, abstraction faite du démarrage, compenser le moteur à chaque charge en modifiant λ, et ceci sans être obligé de donner à l'entrefer δ une valeur particulièrement faible. En outre, on peut encore considérer dans le diagramme la chute ohmique et la tension de dispersion E''_s, ainsi que le courant magnétisant dewatté J' du transformateur série. La tension E''_s a surtout une valeur considérable au démarrage (λ étant faible), de sorte que la tension dans l'inducteur E_f est faible. C'est pourquoi, dans le moteur Winter-Eichberg (fig. 10), le flux K_a est très petit au démarrage, ce qui est avantageux au point de vue de la formation d'étincelles.

Le diagramme du *moteur compensé* avec transformateur série est tracé sur la figure 50 d'après le schéma de la figure 51. On peut distinguer trois circuits dans un ordre arbitraire. En premier lieu, il existe, dans le circuit des balais court-circuités, une f. é. m. E_q résultante de E'_r parallèle à K_q et de E_i perpendiculaire à K_a. Cette f. é. m. produit le courant rotorique :

$$J'_a = \frac{\sqrt{E_q^2 - E_s''^2}}{w_a},$$

[1] Cette vitesse est cependant toujours voisine du synchronisme.

Digitized by Google

en désignant par E''_s la tension de dispersion de l'induit qui dépend de J_a. Pour le circuit secondaire du transformateur série, dont nous désignerons le flux par K_t, et dont le courant magnétisant J'_μ sera négligé, la somme géométrique des. f. é. m. suivantes est nulle :

E_r sur K_a, E'_i perpendiculaire à K_q, E'_s perpendiculaire à K_q (tension de dispersion de l'induit), J_a $(w_a + w'_t)$ parallèle à

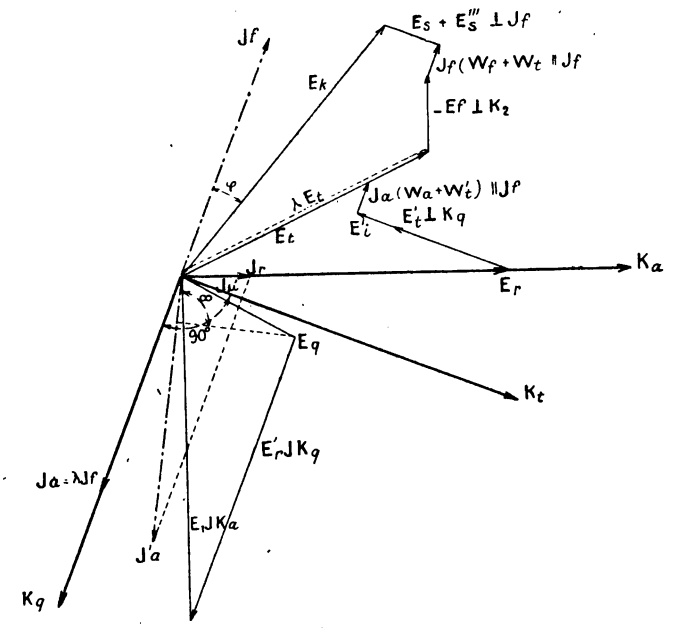


Fig. 50.

J_a ou J_f, et E_t, f. é. m. du transformateur. On a finalement, pour le circuit primaire, la somme géométrique

$$\lambda E_t + E_f + J_f(w_f + w_t) + E_s + E''_s = E_k ,$$

différence de potentiel aux bornes.

En composant J'_a et J_μ avec le courant inducteur J_f (1), on détermine la valeur de l'angle de décalage φ entre E_k et J_f. Strictement, l'on devrait composer encore J'_μ avec J_f, ce qui augmenterait la valeur de φ, puis J_r parallèle à E_k, repré-

(1) Cela est exactement rigoureux pour les ampère-tours correspondants.

Digitized by Google

sentant les pertes dans le fer et dans les frottements, ce qui diminuerait la valeur de φ.

Les courbes d'un moteur de 100 chevaux de Eichberg (Union E. G.) sont données sur la figure 52 : la valeur du rapport de transformation λ du transformateur série est inscrite à côté de chaque courbe. Le moteur est construit pour 6.000 volts et 25 périodes par seconde ; le rapport des engrenages est 1/4,26 et le diamètre des roues 1.000 mm.

L'influence des ampère-tours AW_k des *bobines court-circuitées par les balais* est différente pour le moteur série et le moteur à répulsion ou moteur compensé. La grandeur de ces ampère tours AW_k est approximativement :

$$AW_k = 0{,}1\,\gamma\,\frac{\Sigma e.\frac{Z}{2k}}{w_k};$$

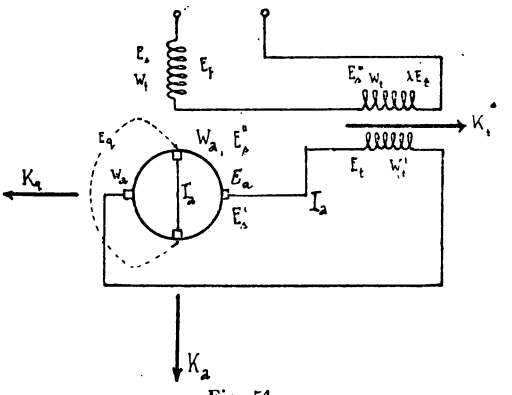


Fig. 51.

(γ = nombre de lames couvertes par balai, $\frac{2k}{Z}$ = nombre de tours par lame du collecteur, w_k = résistance d'une série de balais, Σe = somme géométrique de toutes les f. é. m. dans une bobine mise en court-circuit par les balais). Pour le moteur série, ces ampère-tours AW_k s'additionnent géométriquement aux ampère-tours AW de l'inducteur pour toutes les charges sous un angle compris à peu près entre 90° à 180°, si la vitesse varie de zéro à l'infini. L'effet est que le cos φ est augmenté et que la vitesse est diminuée par AW_k pour toutes les charges. La valeur de Σe passe cependant par zéro au voisinage du synchronisme, pour le moteur à répulsion ou compensé, et change son signe, c'est-à-dire que, au-dessous du synchronisme, les ampère-tours des bobines court-circuitées ont le même effet pour le moteur à répulsion que pour le moteur série, mais, au delà du synchronisme, le cos φ est diminué et la vitesse est augmentée

Digitized by Google

par AW_k ; c'est pourquoi la courbe du cos φ (fig. 40) est plus élevée pour le moteur à répulsion (courbe 2) au-dessous du synchronisme et s'abaisse rapidement au delà du synchronisme.

La C^ie E. A. G. (Lahmeyer et C^o), qui construit le moteur Schüler, a établi aussi un moteur à répulsion compensé

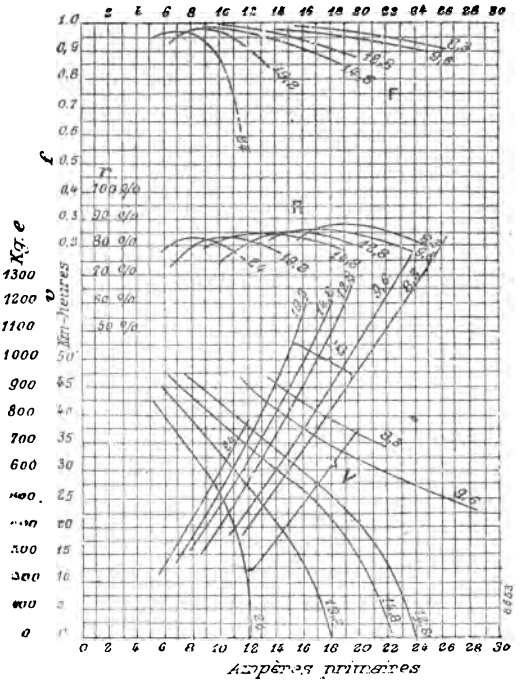


Fig. 52.

(fig. 53). Sur le collecteur frottent deux systèmes de balais, l'un b_1b_1 dans la direction du flux du stator, l'autre b_2b_2 perpendiculairement à cette direction. Chaque balai du premier système est relié directement à un balai du second système, de sorte qu'un groupe de balais b_1b_2 est électriquement équivalent à un seul balai large. Les connexions des balais sont reliées à un transformateur réglable s_1s_2 dont l'enroulement primaire est connecté au réseau, parallèlement à l'inducteur

Digitized by Google

qui n'est pas représenté sur la figure. Le mode de fonctionnement correspond à celui du moteur compensé de Eichberg, mais ce moteur est shunt.

Déri a décrit, au Congrès d'électricité de Saint-Louis, un moteur série dans lequel certains points du collecteur sont reliés entre eux. On forme ainsi une sorte d'induit en court-circuit. Les balais ne sont pas parcourus par le courant de travail, ce qui simplifie le collecteur.

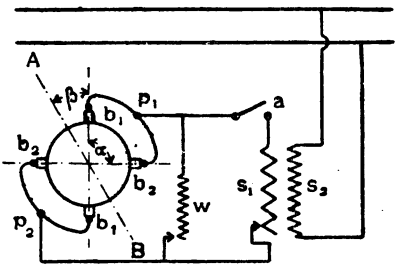


Fig. 53.

Dans le « Journal of the College of Engineering, Tokio University » (1), Seijiro Sugiyama établit, en se basant sur la méthode de calcul de Steinmetz, une comparaison intéressante entre les différents types de moteurs :

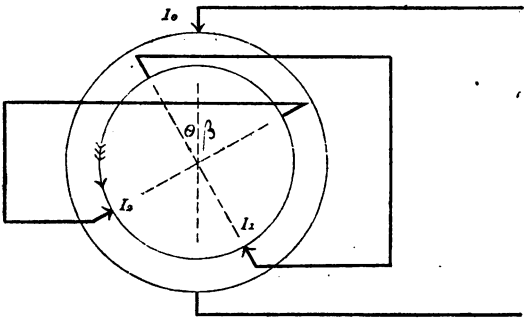


Fig. 53 *a*.

1° Moteur série simple avec transformateur pour l'induit ;
2° Moteur shunt — — —
3° Moteur à répulsion ordinaire ;
4° Moteur à répulsion de Steinmetz (fig 53 *a*) ;
5° Moteur Winter-Eichberg (fig. 10) ;

(1) 1904, vol. II, n° 2.

Digitized by Google

6° Moteur série avec bobine-amortisseur (fig. 53 *b*) et transformateur avant l'induit ;

7° Moteur à répulsion d'induction de Milch dont le couple est déterminé par l'harmonique 3 du courant.

La comparaison se rapporte au moteur de traction de la General Electric C° à 4 pôles, 25 périodes, 1.000 volts au réseau, 100 kw. de puissance au synchronisme ($n = 750$) et un couple de démarrage égal à cinq fois le couple normal. Les dimensions principales de ce moteur sont les suivantes : diamètre extérieur du rotor 560 mm. ; diamètre intérieur 255 mm. ; entrefer 3,2 mm. ; diamètre extérieur du stator 865 mm. ; lon-

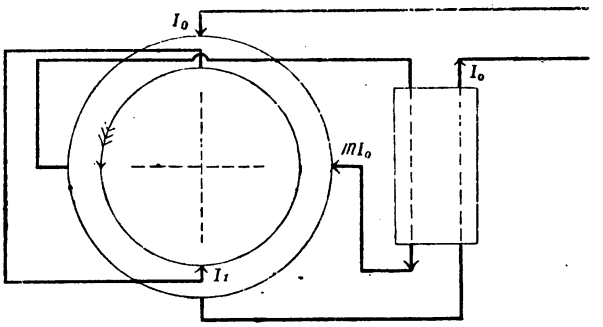


Fig. 53 *b*.

gueur axiale du fer 343 mm. ; nombre d'encoches au stator 63 ; dimensions de ces encoches 66 × 15,8 mm. ; nombre d'encoches au rotor 72 ; dimensions de ces encoches 44,5 × 13 mm. ; diamètre du collecteur 458 mm. ; longueur 280 mm. ; nombre de lames 216 ; nombre de balais 4 × 4 ; section des balais 63,5 × 19 mm² ; enroulement ondulé simple au stator ($a = 1$), 18 conducteurs actifs par encoche ; enroulement imbriqué au rotor, 6 conducteurs de 7,8 × 3 mm. par encoche.

Dans la comparaison, l'auteur a admis en général une tension d'alimentation de 1.000 volts et un angle $\widehat{\beta} = 75°$ (fig. 9) pour les n°s 1 à 3 : pour le moteur shunt cependant, il a adopté la tension de 500 volts et, pour le moteur à bobine-amortisseur, celle de 3.750 volts. Les propriétés caractéristiques de tous ces types, sauf le moteur n° 7, ont été trouvées très semblables : le couple de démarrage étant égal à cinq fois le couple normal, la valeur

Digitized by Google

de cos φ au synchronisme était égale à 0,93 pour les moteurs 1, 3 et 6, à 0,95 pour le moteur n° 2 et à 0,98 pour le n° 5. Le rendement η au synchronisme avait les valeurs suivantes :

N°	1	2	3	5	6
η	90	89	88	87	90 %

Pour tous les types, la valeur maxima de cos φ atteint presque l'unité au delà du synchronisme.

Le premier moteur d'essai à répulsion de la General Electric C° a approximativement les caractéristiques suivantes :

4 pôles, 25 périodes, 500 volts, $\beta = 73°$.

Puissance	48 kw à 750 tours.
Couple de démarrage	5 fois le couple normal.
Diamètre extérieur du stator	660 mm.
— — du rotor	330 mm.
Valeur de l'entrefer	1,58 mm.
Diamètre intérieur du rotor	127 mm.
Longueur axiale	254 mm.
Encoches du stator	73 de 41 × 9,3 mm.
— du rotor	59 de 25,8 × 9,3 mm.
Diamètre du collecteur	280 mm.
Longueur	230 mm.
Nombre de lames	117.
Nombre de balais	4 × 4 de 51 × 12,8 mm.
Genre d'enroulement sur le stator et le rotor	enroulement ondulé.
Nombre de conducteurs par encoche : sur le rotor	4 barres de 8,9 × 3,3 mm.
Nombre de conducteurs par encoche : sur le stator	10 fils.
Rendement (au synchronisme, maximum)	81 %.
Cos φ (au synchronisme)	94 %.

II. — COUPLE

Le *couple* M est donné, d'une façon générale, par l'équation :

$$M = \sum C.Z.J. \sin \alpha \cos \gamma,$$

Digitized by Google

Z désignant le nombre de conducteurs dans la partie induite,
J le courant dans cette partie,
K le flux dans cette partie,
α l'angle dans l'espace entre K et les ampère-tours qui correspondent à l'enroulement induit, $AW = \frac{J.Z}{8.a.p}$
γ l'angle dans le temps entre J et K,
C une constante.

Le champ principal K_a et le champ transversal K_q produisent tous deux un couple, par exemple :

$$M = C_1.Z.J.K_a.\sin\alpha_1\cos\gamma_1 + C_2.Z.J.K_q.\sin\alpha_2\cos\gamma_2,$$

où α_1 est l'angle $\widehat{K_a, AW_a}$ dans l'espace,
α_2 — $\widehat{K_q, AW_a}$ dans l'espace,
γ_1 est l'angle $\widehat{K_a, J}$ dans le temps;
γ_2 — $\widehat{K_q, J}$ dans le temps;

J et Z peuvent se rapporter à l'inducteur ou à l'induit. Pour le moteur à répulsion, on a (fig. 6), en appelant β l'angle complémentaire de l'angle α :

$$M = C.J_a.K_q.Z_a.\sin\beta\cos\gamma$$

ou approximativement :

$$M = C'.J_f.E'_i.\sin\left(\widehat{J_f, E'_i}\right).$$

Pour le moteur compensé : $M = C'.J_f.K_q.Z_f$.

Dans les deux cas, comme on le voit facilement, le couple M est proportionnel à K_q^2 et, par suite, à E_k^2. Pour le moteur compensé avec transformateur série, on a : $M = C.J_f.J_s$, en désignant par J_s le courant secondaire du transformateur.

En remplaçant le signe d'égalité par un signe $\equiv$ qui veut dire « proportionnel à », on peut écrire $M \equiv Z_a J_a K_a \equiv Z_a.Z_f J_f.J_a$ et, pour le moteur série ($J_a = J_f = J$) : $M \equiv Z_a Z_f.J^2 \equiv \frac{Z_a}{Z_f} K_a^2$.

En substituant la valeur de K_a, on trouve :

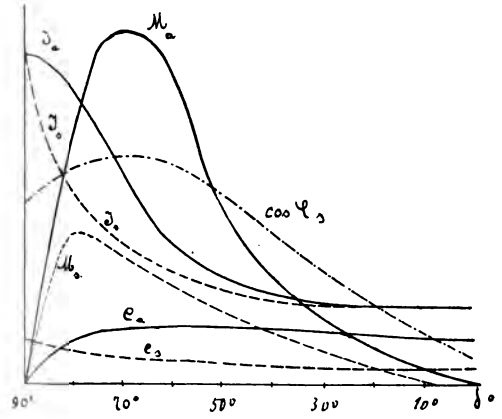
$$M \equiv \frac{Z_a}{Z_f}\frac{E_k^2}{n^2(Z_f+Z_a)^2 + n_r Z_a^2} \equiv \frac{Z_a}{\sqrt{n^2(Z_f+Z_a)^2 + n_r Z_a^2}} J.E_k$$

c'est-à-dire que le couple dépend des *voltampères* $J.E_k$ et non des watts $J.E_k\cos\varphi$. Si l'on ajoute un transformateur série entre l'inducteur et l'induit, JE_k doit être remplacé par

Digitized by Google

$\lambda E_k J_f$, λ étant le rapport de transformation et J_f le courant dans l'inducteur. Pour trouver le couple de démarrage, il suffit de poser $n_r = 0$.

Pour le moteur à répulsion, le couple M_a (fig. 53 *c*) de démarrage croît d'abord quand l'angle β des balais, par rapport à la zone neutre, augmente : il passe par un maximum pour des valeurs de β comprises entre 60° et 80°, puis diminue pendant que le courant J_a continue à augmenter. Le maximum de couple M_s (fig. 53 *c*) et le maximum de facteur de puissance $\cos \varphi_s$ ne coïncident pas. Les courbes M_s, $\cos \varphi_s$ et J_s correspondent à la vitesse de synchronisme. Si l'on veut faire



Légende : *Abscisses* angles β
M_a = Couple de démarrage,
J_a = Courant de démarrage,
J_s = Courant au synchronisme.
M_s = Couple au synchronisme
$\cos \varphi_s$ = Facteur de puissance au synchronisme.
e_a = F. é. m. dans les bobines court-circuitées au démarrage.
e_s = *idem* au synchronisme.

Fig. 53 *c*.

développer en marche permanente le couple maximum, il faut décaler les balais dans le sens de rotation à mesure que la vitesse augmente, c'est-à-dire augmenter la valeur de l'angle β. Dans le moteur compensé à transformateur série, on peut aussi modifier le couple dans de larges limites en faisant varier la différence de potentiel aux bornes et en modifiant le rapport de transformation λ du transformateur série. Le couple M est donné, dans ce cas, par l'équation $M = C.\lambda.J_f.K_q.Z_f$: plus la tension d'excitation en *aa* est élevée (fig. 49), c'est-à-dire plus le rapport de transformation λ est grand, et plus M est grand.

Dans le moteur compensé, le couple peut aussi être modi-

Digitized by Google

fié par décalage des balais, d'après la formule (fig. 49):

$$M = C \cos \alpha (1 + \sin \alpha) J_f^2 \quad (1)$$

en désignant par J_f le courant du réseau, par α l'angle entre le système de balais court-circuités et l'axe du champ, et par E_k la différence de potentiel aux bornes.

Pour le couple de démarrage, on a, dans ce cas, la relation :

$$M_a = c . E^2_k \frac{\cos \alpha}{(1 + \sin \alpha)^3}.$$

Pour $\alpha = 0$ au démarrage et avec une différence de potentiel constante aux bornes, le courant J_f passe de la valeur J_0 à la valeur J_{max} quand $n_r = \frac{n}{\sqrt{2}}$, puis tombe à la valeur J_0 pour $n_r = n$ et s'approche de zéro quand n_r augmente. La composante déwattée est égale à J pour $n_r = 0$ et s'annule pour $n_r = n$, puis elle atteint un maximum négatif (décalage en avant pour $n_r = n\sqrt{2}$ et s'approche ensuite de zéro.

Une grandeur intéressante aussi est le couple par unité de courant. Tandis que le couple maximum d'un moteur à répulsion peut être atteint pour $90 - \beta = 6° 30'$, le maximum de cette grandeur est atteint seulement pour $90 - \beta = 11°$. Pour $\beta = 45°$, la valeur du couple est égale à $\frac{1}{20}$ de la valeur maxima, tandis que le couple par unité de courant est égal à 40 % de sa valeur maxima.

Le couple du moteur monophasé à collecteur a une nature pulsatoire et varie toujours entre zéro et un maximum M_{max}. Le couple moyen utilisable n'est que

$$M_m = \frac{1}{\pi} M_{max} \int_0^{\pi} \sin^2 \alpha d\alpha = \frac{1}{2} M_{max}.$$

La puissance absorbée $EJ \cos \varphi$ oscille aussi périodiquement d'après la loi :

$$e_{max} i_{max} \sin \alpha \sin (\alpha - \varphi).$$

Ce fait présente de gros inconvénients pour les moteurs de traction au point de vue du patinage des roues.

De plus, pour le même flux inducteur K et pour la même intensité de courant efficace J dans l'induit, le couple M_m du

(1) Lehmann : *Eclairage Electrique*, 1904.

Digitized by Google

moteur monophasé n'est que les 70% du couple d'un moteur à courant continu de mêmes dimensions. En effet, K étant la valeur maxima du flux, on a, pour le moteur monophasé :

$$M_m = \frac{C}{\pi}\int_0^{\pi} K.\sin\alpha.\sqrt{2}.J.\sin\alpha d\alpha = 0{,}7.C.J.K\,(1).$$

Pour le moteur à courant continu, l'on a $M_c = C.K.J.$

Aussi bien dans le moteur série que dans le moteur à répulsion, la vitesse augmente quand le couple diminue : dans le dernier, le couple nul est atteint pour une vitesse finie, c'est-à-dire que le moteur à répulsion est moins dangereux au point de vue de l'emballement. La diminution du couple avec l'augmentation de vitesse est beaucoup moins rapide dans le moteur série ; par contre, le couple de démarrage est plus grand dans le moteur à répulsion.

III. — COMMUTATION ET PRODUCTION D'ÉTINCELLES

Quoique le problème de la commutation des moteurs monophasés ne soit pas différent en principe de celui que présentent les moteurs à courant continu, il est cependant plus compliqué.

En premier lieu, il s'agit du renversement du *courant alternatif* $+ i_z$ d'une branche de l'induit en la valeur négative $- i_z$ (fig. 54 à 57). Il y a lieu de remarquer que la valeur instantanée de $\pm i_z$ varie pendant ce temps, et par suite aussi l'allure du courant de court-circuit i_k. Dans chacune des figures 55 à 57, le courant au début de la commutation est désigné

---

(1) Exactement, on a, pour le moteur série monophasé :

$$M_m = \frac{J'E_r}{\frac{2\pi n_r}{p}.9{,}81} = \frac{J'\frac{1}{\sqrt{2}}n_r Z'_a K_a}{\frac{2\pi n_r}{p}.9{,}81}\,10^{-8} = 1{,}15.p.Z'_a.K_a.J'.10^{-6}.$$

Pour le moteur à courant continu, on a :

$$M_c = \frac{J'E_r}{\frac{2\pi n_r}{p}.9{,}81}\;\frac{J'.n_r.Z'_a.K_a.10^{-8}}{\frac{2\pi n_r}{p}9{,}81} = 1{,}61.p.Z'_a.K_a.J'.10^{-6}.$$

J' est, dans les deux cas, le courant d'utilisation, c'est-à-dire la composante wattée diminuée du courant de pertes J_v.

Digitized by Google

par i_1 et, à la fin de la commutation, par i_2, $i_1 - i_2$ étant toujours inférieur à $2(i_z)_{max}$ et étant nul dans un cas (fig 57). Le courant de court-circuit dans la bobine placée sous le balai est désigné par i_k. La durée d'une période du courant alternatif employé est $T = \frac{1}{n}$: la durée de la commutation est

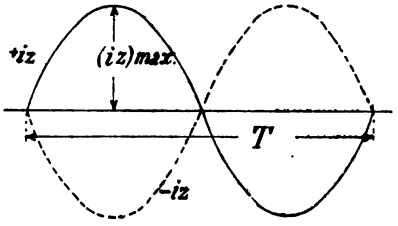


Fig. 54.

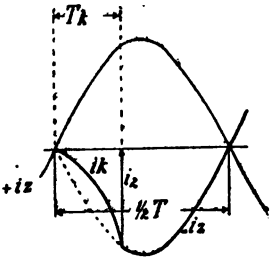


Fig. 55.

$T_k = \frac{1}{2n_k}$, en appelant n_k la fréquence de la commutation qui, pour l'enroulement imbirqué, peut être prise égale à $\frac{v_k}{2s_b}$,

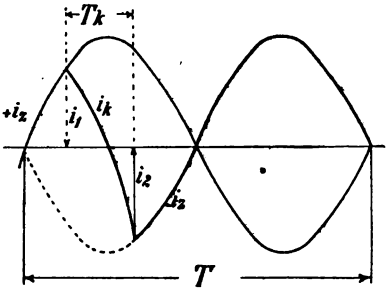


Fig. 56.

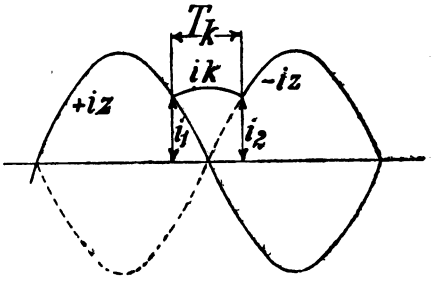


Fig. 57.

en désignant par v_k la vitesse du collecteur et par s_b l'épaisseur des balais.

En second lieu, en plus de la *force électromotrice produite par la rotation* $e_r = \frac{2}{\sqrt{2}} . n_r . Z_k . K_k . 10^{-8}$,

et de la *f. é. m. de réactance*

$$e_R = L\frac{di_k}{dt} = 2 . n_k . L(i_1 - i_2) = \text{approximativement } 4 . n_k . L . J_s ,$$

Digitized by Google

il existe, pendant la commutation, dans un moteur monophasé, différentes *f. é. m.* e_i *induites par les champs alternatifs* et répondant à la formule générale : $e_i = \frac{2}{\sqrt{2}} . n . Z_k . K . 10^{-8}$, K désignant soit le champ principal, soit le champ transversal.

(Dans les formules précédentes,
Z_k désigne le nombre de conducteurs de la bobine court-circuitée,
K_k la variation de flux produite dans cette bobine par la rotation,
L le coefficient de self-induction de cette bobine, englobant aussi l'induction mutuelle,
J_z la valeur efficace du courant par branche.
e_r, e_R et e_i sont les valeurs efficaces.)

Si l'on réunit sous le symbole $\sum i_k w$ les chutes ohmiques dans les bobines considérées, y compris les balais, on peut, en tenant compte du signe de chacune des f. é. m., écrire pour le circuit court-cicuité par le balai : $e_r + e_R + e_i + \sum i_k w = 0$, le signe additif indiquant une addition géométrique.

On en déduit : $$i_k = \frac{e_r + e_R + e_i}{\sum w}$$

On peut, en adoptant une disposition convenable de balais ou en employant des flux de dispersion appropriés qui agissent sur la bobine, donner à la f. é. m. e_r une valeur telle que la f. é. m. e_R soit compensée. Ces f. é. m. e_r et e_R n'apparaissent que quand l'induit tourne et croissent toutes deux quand la vitesse n_r augmente. Au contraire, la f. é. m. e_i existe à l'arrêt et à toutes les vitesses, et produit dans le court-circuit un travail $\frac{e_i^2}{w}$ qui croît avec le flux K. Dans la suite, nous appellerons « effet d'induction » l'effet produit par la f. é. m, e_i et « effet de rotation » l'effet produit par les f. é. m. mentionnées précédemment.

La principale différence entre le moteur à répulsion et le moteur série est la suivante : Dans le premier, quand la vitesse augmente, $$e_r = c . K_a . n_r \text{ (rotation)}$$ $$\text{et } e_i = c' . K_q . n \text{ (induction)},$$ se rapprochent de plus en plus en grandeur, leur décalage

Digitized by Google

devenant de plus en plus voisin de 180° : il en résulte que, au voisinage du synchronisme, la résultante e_k de e_r et e_i, dont la valeur est $e_k = c.K_q.\left[1-\left(\frac{n_r}{n}\right)^2\right]$, s'annule, ou presque. Au synchronisme, on a $n_r = n$ et aussi $K_a = K_q$, ces deux vecteurs étant perpendiculaires l'un à l'autre. Il en est de même pour $e'_r = C.K_q.n_r$ et $e'_i = C.K_a.n$.

Quand la vitesse s'écarte de celle du synchronisme, e_r et e_i forment un angle obtus, et la résultance e_k n'est pas négligeable. Dans le moteur série, l'effet d'induction existe à toutes les vitesses et rend difficile la construction de gros moteurs. Dans le moteur à répulsion, on peut se représenter les phénomènes en jeu dans la bobine court-circuitée en disant qu'il existe au synchronisme un champ tournant circulaire, les champs alternatifs pulsatoires disparaissant et, avec eux, l'effet d'induction. Ce champ tourne avec la vitesse de l'induit $n_r = n$ et n'a pas d'action sur la bobine en court-circuit : même quand la vitesse s'écarte sensiblement du synchronisme, le champ tournant elliptique ne produit pas d'effets considérables. Pour des vitesses de 25 à 40 % au-dessus et au-dessous du synchronisme; la commutation du moteur à répulsion est plus mauvaise que celle du moteur série.

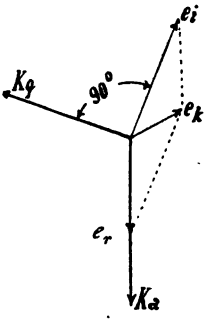


Fig. 58.

Les conditions sont également bonnes dans le moteur compensé, comme dans le moteur à répulsion. En ce qui concerne le circuit des balais court-circuités *b b* (fig. 49), la f. é. m. e_r est nulle à l'arrêt : quand le moteur tourne, elle a la valeur $e_r = c.\frac{n_r}{n}.K_a = c\left(\frac{n_r}{n}\right)^2 K_q$; au synchronisme (1), on a $e_r = -e_i$, la

(1) D'une façon générale, pour la vitesse de rotation n_r il existe dans la bobine court-circuitée une f. é. m. résultante e_k qui répond à l'équation $e_k = c\left[1-\left(\frac{n_r}{n}\right)^2\right].K_q$.

Pour le démarrage et la marche hypersynchrone, il est important de maintenir faible le flux K_q dans la direction des balais d'excitation *a a*, ce qui est facile avec l'emploi d'un transformateur de réglage possédant peu de tours au secondaire.

Digitized by Google

f. é. m. e_i étant constante à toutes les vitesses de rotation et égale à $c.K_q$.

Pour les balais d'excitation $a\,a$, les f. é. m. $e_i = c.K_a = \frac{n_r}{n} K_q$ et $e_r = c\frac{n_r}{n}$ se compensent à toutes les vitesses de rotation.

Par conséquent, dans le moteur à répulsion et le moteur compensé, la commutation n'est pas plus difficile, au voisinage du synchronisme, que dans un moteur à courant continu. Au démarrage, d'ailleurs, l'effet d'induction est un peu plus considérable dans le moteur à répulsion que dans le moteur série ; de même, les conditions de commutation deviennent mauvaises au delà du synchronisme.

Dans le moteur à répulsion, et aussi dans les autres types de moteurs, la *position des balais*, c'est-à-dire l'angle β (fig. 9) a une influence sur les tensions e_i dans la bobine en court-circuit. Pour $\beta = 90°$, elle est nulle, et elle croît rapidement quand la valeur de β diminue.

Dans la figure 53$_c$, e_a est la f. é. m. dans les bobines court-circuitées au démarrage, et e_s cette f. é. m. au synchronisme.

Dans le moteur série en général, et dans les moteurs à répulsion et compensé au démarrage et au delà du synchronisme, l'effet d'induction peut être réduit par les moyens suivants :

a) Choix d'un *grand nombre de lames* au collecteur et emploi de l'enroulement imbriqué, qui conduit à l'emploi d'un grand nombre de lames.

b) Emploi de *balais minces,* couvrant peu de lames : pour des moteurs de traction il ne faut cependant pas descendre au-dessous de 6 à 10 mm. pour l'épaisseur des balais.

c) Emploi de *fortes résistances* w dans les connexions entre les lames du collecteur et les bobines induites ; cela augmente l'encombrement, les pertes et l'échauffement. Naturellement, il faut employer des balais en charbon. Lamme place maintenant ces résistances de commutation dans le fond des encoches, ce qu'avaient déjà fait Ganz et C^{ie}, ainsi que Kelly.

d) Choix d'un flux faible K_a, car on a : $e_i = C_1.n.K_a.Z_k$.

Le couple de démarrage nécessaire est obtenu par l'emploi

Digitized by Google

d'un courant intense J_a. Pour que, au démarrage, le flux K_a, qui est approximativement proportionnel à $J_a = J_f$, n'atteigne pas une valeur trop considérable, on peut, soit employer un transformateur primaire qui abaisse la différence de potentiel et aussi le couple maximum; soit employer un transformateur série (fig. 9) établi pour avoir un petit nombre de tours secondaires au démarrage, ce qui augmente le courant dans l'induit et, en même temps, l'inductance primaire ; soit encore saturer d'une façon considérable le fer du circuit magnétique, spécialement dans l'inducteur, de façon qu'une augmentation considérable de courant ne produise qu'une faible augmentation du flux.

e) Disposition de plusieurs enroulements induits entrelacés (sandwiching) fermés sur eux-mêmes indépendamment les uns des autres (fig. 59) : dans ce cas, on sépare les balais en deux parties étroites réunies entre elles par une résistance (1) dont le milieu est connecté au conducteur de courant. Au lieu de relier les deux balais par une résistance, on peut aussi les relier par deux bobines inductrices produisant des f. é. m. opposées, et connecter le conducteur entre ces deux bobines, comme l'indique le schéma de la figure 60 dû à Heubach.

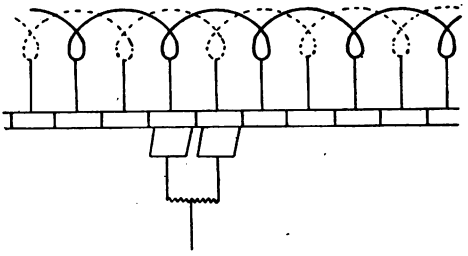


Fig. 59.

L'emploi de plusieurs enroulements ne fait d'ailleurs que déplacer la difficulté : il n'a jamais donné de bons résultats dans les machines à courant continu. Récemment, Mac Neill a proposé un enroulement triple (E.W.E. Août 1904); il existe pour chaque pôle deux lignes de balais juxtaposées et entièrement séparées, chaque ligne de balais étant reliée, ainsi que la bobine inductrice en série avec elle, à l'un des deux enrou-

(1) D'après le brevet autrichien 17 253, Sautter-Harlé et Cie emploient, avec les enroulements multiples, un balai antérieur (dans le sens du mouvement) plus mince que l'isolant séparant deux lames.

Digitized by Google

lements secondaires d'un transformateur dont le primaire est relié au réseau.

f) Par l'emploi de *pôles simples de commutation* entre les pôles principaux; il faut les exciter par un courant dérivé des bornes avec un décalage de 180° sur la f. é. m. résultante dans les bobines court-circuitées ; pendant le démarrage, il n'y a pas de compensation.

g) Par l'emploi de *pôles doubles de commutation* (fig. 61) placés entre les pôles principaux. Ces pôles auxiliaires sont excités par le courant principal et produisent, dans la bobine en court-circuit, un flux opposé au flux principal et capable de

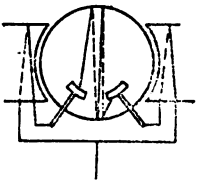


Fig. 60.

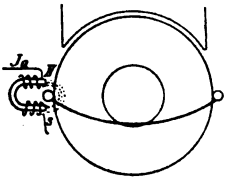


Fig. 61.

neutraliser complètement l'effet du court-circuit, sans influencer le couple.

h) Par *décalage des balais*, en se plaçant dans des conditions analogues à celles du moteur à répulsion.

Pour diminuer la *tension de réactance*, on peut opérer d'une façon identique à celle employée dans les moteurs à courant continu, qu'il s'agisse du moteur série, du moteur à répulsion, ou du moteur compensé.

1°) En choisissant un grand nombre de lames au collecteur et de faibles coefficients de self-induction des bobines induites. Pour ne pas augmenter trop la fréquence de commutation n_k, il ne faut pas aller trop loin dans cette voie pour le moteur à répulsion et le moteur série. Pour le moteur série, il est avantageux de choisir un grand nombre de pôles.

2°) En diminuant, dans le moteur série, le flux transversal

Digitized by Google

par une division des pôles inducteurs (fig. 36, brevet Finzi) ou par une bobine transversale (1) (figures 37 et 38), ce dernier moyen entraînant une forte augmentation du poids de cuivre placé sur l'inducteur et une diminution du rendement.

3°) En créant, par une forme appropriée des pôles, un champ de commutation K_k qui produit une tension égale à la tension de réactance $e_r = c.nK_k = e_R$.

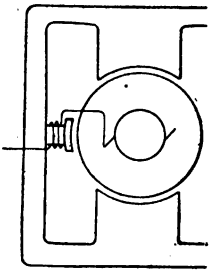


Fig. 62.

4°) En employant des pôles auxiliaires de commutation non excités, ce qui a le même effet que 3°, ou mieux excités par le courant principal (fig. 62) et produisant, à toutes les charges, une f. é. m. $e_k = e_R$. Dans la figure 63, relative au dispositif des Ateliers d'Oerlikon, le courant dans les pôles auxiliaires est tel que son décalage par rapport au courant principal soit inférieur à 90°, de sorte que le flux auxiliaire neutralise toutes les forces électromotrices de la bobine en court-circuit.

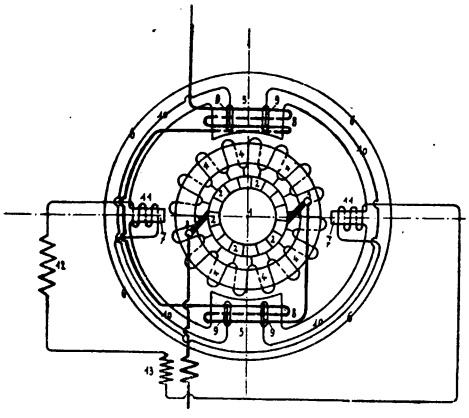


Fig. 63.

Il est rationnel de disposer les pôles auxiliaires de façon à ce qu'ils soient ajustables radialement et suivant la périphérie de l'induit, et que le courant d'excitation de ces pôles puisse être modifié en grandeur et en phase.

Pour le moteur série, les pôles de commutation peuvent aussi être remplacés par un enroulement réparti, tel que l'emploient Ryan et Déri pour le courant continu.

La tension de réactance en elle-même a une valeur plus élevée dans tous les moteurs à enroulement réparti et à encoches

(1) Moyen employé dès 1892 par Ganz et Cie.

Digitized by Google

fermées (moteur à répulsion et moteur compensé), que dans les moteurs à pôles saillants, car les lignes de force des bobines en court-circuit peuvent se fermer dans le fer du stator, ce qui est aussi vrai pour les moteurs à pôles de commutation.

En pratique, il est presque impossible d'arranger les pôles de commutation de telle sorte qu'il y ait une compensation parfaite et automatique pour toutes les charges, et, d'autre part, il est très difficile de construire des moteurs à collecteur dont la *f. é. m.* résultante $\Sigma e = e_i + e_r + e_R$ dans les bobines court-circuitées par les balais soit assez faible pour éviter des étincelles nuisibles. Pour le démarrage, Σe est égal à e_i qui possède dans ce cas une valeur très grande à cause de la forte intensité du courant de démarrage, et, justement pour ce cas, il n'y a aucune compensation, si l'on ne veut pas employer les pôles doubles de commutation (fig. 61). En outre, tous les pôles de commutation doublent à peu près la tension de réactance e_R. Pour le moteur série, qui doit être muni d'un enroulement transversal de compensation (fig. 37, 38 et 39), pour réduire la valeur de e_r au minimum, la tension de commutation Σe atteint un minimum pour un certain courant principal pas trop loin du synchronisme; pour des valeurs de courant plus grandes et plus petites, Σe augmente peu à peu. L'excitation des pôles de commutation ne doit donc pas être proportionnelle au courant principal J et, en outre, sa phase doit varier avec l'intensité J du courant principal ; au démarrage, l'angle entre Σe et J est à peu près égal à 20° : pour de grandes vitesses, il s'approche de zéro. C'est pourquoi il est possible d'atteindre une compensation *partielle* tout aussi bien par un courant d'excitation dérivé du courant principal ou de la tension aux bornes. Pour une compensation à peu près parfaite, il faudrait modifier l'intensité du courant d'excitation par un transformateur auxiliaire et sa phase par une self-induction ou un condensateur, suivant les variations de la charge, et ce serait une méthode extrêmement compliquée. Pour le moteur à répulsion, de même que pour les balais en court-circuit du moteur compensé, la tension de commutation Σe diminue dès le démarrage jusqu'au synchronisme où $e_i - e_r = 0$ et Σe est approximativement zéro (égal à la tension

Digitized by Google

de réactance) ; au delà du synchronisme, Σe change de sens et augmente de nouveau rapidement. Le courant d'excitation des pôles de commutation devrait donc suivre une loi semblable à Σe pour ces types de moteurs ; il faudrait l'inverser au voisinage du synchronisme.

La variation de la tension de commutation Σe est beaucoup plus grande pour les moteurs à répulsion et compensé que pour le moteur série, si l'on suppose les mêmes variations de la charge.

Dans le moteur à répulsion, l'amorçage d'un arc entre les balais n'est pas à craindre, contrairement à tous les autres moteurs à collecteur, car le rotor est court-circuité. Cet amorçage devrait d'ailleurs être moins à craindre avec le courant alternatif, par suite de l'action amortissante de la self-induction et de l'emploi d'inducteurs lamellés. Toutefois, il peut arriver qu'au démarrage avec une forte surcharge, les bobines court-circuitées brûlent.

La réalisation d'une bonne commutation a une importance capitale pour les applications pratiques, et particulièrement pour les applications de traction électrique. Une longue durée d'exploitation, portant sur plusieurs années, peut seule donner des renseignements certains à ce point de vue. En tous cas, le moteur à répulsion et le moteur compensé sont, en principe, supérieurs, à ce point de vue, au moteur série pour les vitesses voisines du synchronisme, mais non pour le démarrage et la marche hypersynchrone : malgré cela, le moteur série a la préférence d'un grand nombre de constructeurs à cause de sa simplicité et de son application directe au courant continu.

Contrairement à ce qui a lieu pour les moteurs monophasés, la commutation des moteurs à collecteur polyphasés n'offre pas de difficulté particulière, parce qu'à toutes les vitesses il n'existe que des champs tournants et pas de champs alternatifs. Il ne s'agit en somme pas d'une commutation du courant, mais d'une transformation de fréquence.

Digitized by Google

IV. — FACTEUR DE PUISSANCE

Le facteur de puissance $\cos\varphi$ est mauvais (1) au démarrage dans tous les moteurs monophasés à collecteur ; en général il est inférieur à 0,5. Le moteur agit comme un transformateur ouvert ou comme un transformateur en court-circuit.

Le courant de démarrage du moteur à répulsion est, à couple égal, un peu plus élevé que celui du moteur série : avec 70 à 90 % environ du courant normal, on peut déjà démarrer à couple normal. Les conditions du démarrage, dans le cas du moteur série simple, sont représentées par le diagramme de la figure 64 dans lequel on a supposé que, pendant le démarrage et la marche, le courant était maintenu à la valeur J au moyen d'un transformateur de démarrage. De plus on a $Ax = E_f$ = force électromotrice de l'enroulement inducteur, qui reste la même au démarrage et pendant la marche, puisque J ne varie pas ; $xB = Jw_f$; $By = E'_s$, tension de dispersion de l'induit ; φ_a est l'angle de décalage au démarrage, et φ l'angle de décalage en marche. Dans le cas où l'on fait démarrer le moteur au moyen de résistances non inductives, $\cos\varphi_a$ est plus grand, mais le rendement est plus faible. Le facteur de puissance pendant la marche peut être rendu égal à l'unité, dans le moteur compensé, pour une charge déterminée : l'emploi d'un transformateur série permet de le rendre égal à l'unité pour différentes charges. Il est inutile de rendre extrêmement petite la tension de dispersion et l'entrefer δ ou le courant magnétisant, ce qui est nécessaire pour le moteur série et le moteur à répulsion (2). Pour ces deux

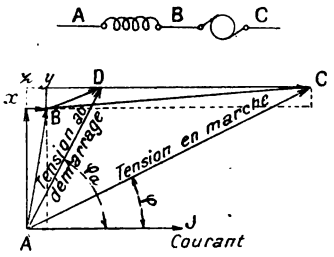


Fig. 64.

(1) C'est là un inconvénient vis-à-vis des moteurs polyphasés ordinaires que l'on fait démarrer au moyen de résistances intercalées dans le rotor : il ne faut d'ailleurs pas perdre de vue que, pour démarrer simplement avec le couple normal, il suffit, avec le moteur à collecteur, d'une intensité de courant inférieure à l'intensité normale.

(2) Le moteur Winter-Eichberg de 100 chevaux à 4 pôles, 25 périodes, a un entrefer $\delta = 3$ mm. Un moteur à répulsion de 90 chevaux, 25 périodes, de la *General Electric C°* a le même entrefer.

Digitized by Google

moteurs, il faudrait, en outre, pour obtenir un bon cos φ en marche, choisir un nombre (1) d'ampère-tours inducteurs petit vis-à-vis de celui de l'induit : enfin, pour le moteur série, il faut que la valeur du rapport $\frac{n_r}{n}$ soit aussi grande que possible, c'est-à-dire que la fréquence employée doit être faible et que la vitesse de rotation doit dépasser, de la plus grande quantité possible, la vitesse de synchronisme. Dans le moteur série, on devrait aussi amortir le flux transversal qui produit la composante déwattée E_i, ou le diminuer par des fentes dans les pôles ou par une saturation élevée dans les masses polaires et dans les dents de l'induit.

Pour le moteur à répulsion, une valeur élevée de l'angle β entre les balais et la zone neutre doit être avantageuse au point de vue de l'obtention d'un bon facteur de puissance, car l'on a approximativement $\operatorname{tg}\varphi = \operatorname{cotg}\beta$. En réalité, cos φ atteint un maximum quand β est compris approximativement entre 70° et 80°. (Fig. 53 *c* : courbe cos φ_s.)

Il y a cette différence caractéristique entre le moteur série et le moteur à répulsion, que, pour le premier type, le cos φ est notablement amélioré par la suppression du champ transversal k_g, tandis que, pour le moteur répulsion, le cos φ maximum se produit pour $k_g = k_a$.

V. — DÉMARRAGE

Si l'on relie un moteur monophasé à collecteur directement au réseau, il y passe le courant maximum possible, produisant le couple maximum. Pour éviter cette pointe de courant et ce couple exagéré qui, d'ailleurs, sont plus faibles que dans le cas du courant continu par suite de la self-induction, on diminue, en règle générale, la différence de potentiel au démarrage par l'un des procédés suivants :

a) Au moyen d'un *transformateur ordinaire* à nombre de bobines variable ;

---

(1) Par exemple, la valeur du rapport :

$$\frac{\text{ampère-tours sur l'induit}}{\text{ampère-tours sur l'inducteur}}$$

atteint le chiffre 5.

Digitized by Google

b) Au moyen d'un *autotransformateur* à rapport de transformation variable ;

c) Au moyen d'un *régulateur de potentiel* ou régulateur d'induction (transformateur tournant) ;

d) Au moyen d'un *transformateur série* à rapport variable alimentant l'induit. Il faut qu'au démarrage le nombre de tours secondaires soit peu élevé : quand la vitesse croît, on augmente peu à peu le nombre de tours secondaires ;

e) Au moyen de *résistances non inductives* comme pour

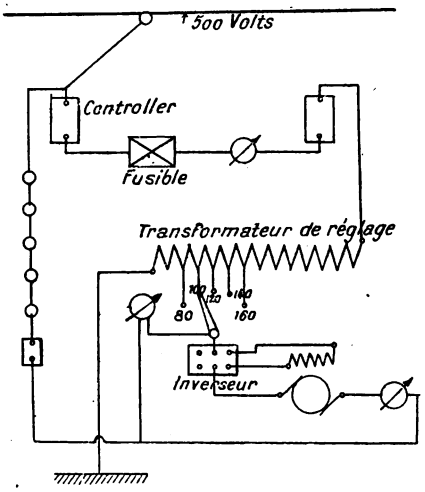


Fig. 65. — Démarreur Finzi.

le courant continu. Cette méthode entraîne une diminution considérable du rendement au démarrage ; elle n'est à recommander que dans les cas où le moteur doit être alimenté tour à tour par du courant continu et par du courant alternatif et peut être alors combinée avec la méthode de réglage *série-parallèle*, permettant de diminuer les pertes dans les résistances. Avec les moteurs à répulsion également, on peut employer avec avantage la méthode série-parallèle. Pour ce type de moteur, on doit intercaler les résistances entre les balais court-circuités, ou bien les relier en parallèle avec une partie de l'enroulement inducteur (fig. 67).

Digitized by Google

f) *En décalant les balais, ou en décalant les connexions entre l'enroulement inducteur et les bornes.*

Les différentes méthodes de démarrage peuvent être combinées entre elles ; par exemple, on peut employer un autotransformateur *a* et un régulateur de potentiel *b* (fig. 68) comme l'a indiqué Lamme. Dans la figure 68 sont représentés également des transformateurs d'équilibre *f* placés en parallèle avec les induits des moteurs *e* pour uniformiser la répartition de la tension : *dd* représentent les inducteurs et *c* l'inverseur.

La méthode (*b*) est en général plus économique que la

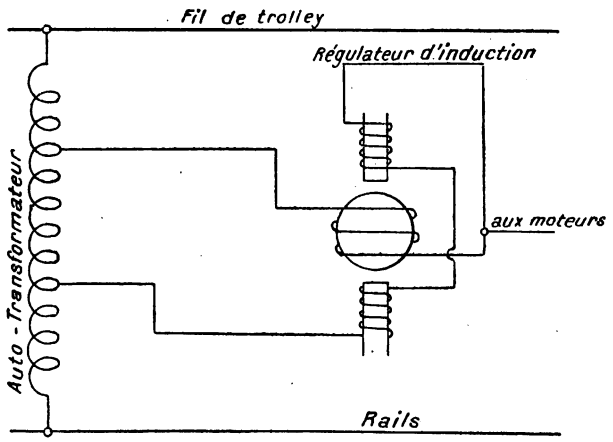


Fig. 66.

méthode (*a*) : la méthode (*c*) offre l'avantage qu'il n'existe aucun contact et aucune rupture comme dans les méthodes (*a*) (*b*) et (*d*). La méthode (*d*) conduit à l'emploi d'un transformateur plus léger que les méthodes (*a*) et (*b*), pesant environ 1/3 du poids du transformateur nécessaire dans ces deux méthodes. Les régulateurs de potentiel pour courant monophasé, qui sont assez lourds et coûteux, sont établis en général de la façon qu'indiquent les figures 69 à 72*b*, dans lesquelles E désigne la différence de potentiel aux bornes du réseau et *e* la tension auxiliaire variable dont la grandeur dépend de l'angle α de la partie mobile de l'appareil. Le dispositif de la figure 70

Digitized by Google

offre l'avantage de n'exiger aucune bobine mobile, mais les deux dispositifs, où la partie mobile est constituée par une masse de fer coupée, possèdent une réluctance magnétique considérable et, par suite, un courant magnétisant élevé, c'est-à-dire un mauvais facteur de puissance. Si l'on emploie une partie mobile dont le fer occupe toute la section du cercle (fig. 72 *b*), il se produit, pour $\alpha \gtrless 0$, des ampère-tours transversaux et un champ transversal intense qui engendre une forte f. é. m. déwattée de self-induction. Ce champ transversal peut être neutralisé au moyen d'un enroulement en court-circuit III (fig. 72 *a* et 72 *b*), comme l'ont employé Lamme (fig. 73) et Fischer-Hinnen. L'influence de la compensation est indiquée par le tableau suivant correspondant aux données de Fleischmann-Eichberg pour un régulateur de potentiel de 10 kilowatts.

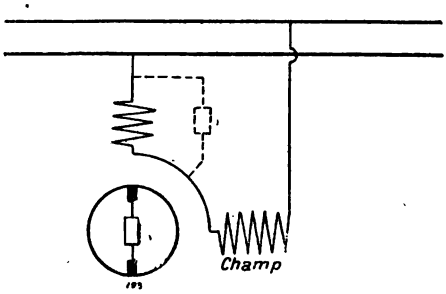


Fig. 67.

TABLEAU

α (POSITION DE LA PARTIE MOBILE)	0°	20°	45°	80°	90°
e (Tension auxiliaire à vide).....	109	115	81	22	0
Appareil compensé (tension auxiliaire) à 100 ampères.....	98	93	70	0	—
Appareil non compensé (tension auxiliaire) à 100 ampères.....	98	90	9	—	—

La rotation des régulateurs de potentiel peut être effectuée avantageusement par un petit électromoteur ou un moteur à air comprimé. Le régulateur de potentiel, employé par Finzi sur les nouvelles locomotives monophasées de 400 chevaux de la Valteline, présente les connexions suivantes : sur le stator d'un moteur d'induction triphasé est placé un enroulement triphasé I établi pour 3.000 volts composés : cet enroulement est relié à la ligne aérienne triphasée. Dans les mêmes enco-

Digitized by Google

ches du stator est placé un enroulement diphasé II établi pour environ 200 volts par phase. Le rotor est muni d'un enroulement diphasé III tout à fait analogue, établi également, par exemple, pour 200 volts. Cet enroulement III est relié en série avec l'enroulement II du stator. Quand on fait tourner le rotor,

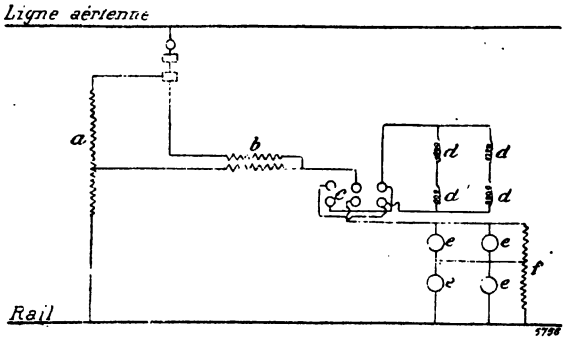


Fig. 68.

on obtient, comme dans les régulateurs de potentiel ordinaires, une variation de tension comprise entre $200 - 200 = 0$ volt

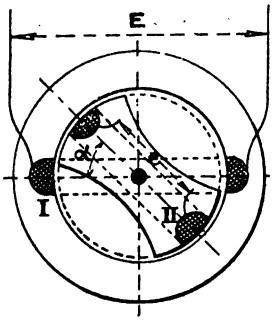


Fig. 69.

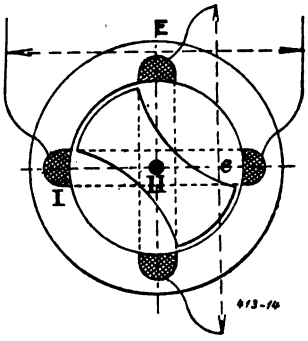


Fig. 70.

et $200 + 200 = 400$ volts par phase. A chacune des phases des enroulements diphasés II et III en série est connecté un groupe de deux moteurs série.

Cet appareil réalise, comme on le voit, en même temps un convertisseur de phases et un transformateur-régulateur. Pour en réduire les dimensions, on peut l'immerger dans l'huile ou le refroidir artificiellement au moyen d'air comprimé.

Digitized by Google

Quand on emploie des transformateurs de démarrage avec bobines en nombre variable, on se heurte à des difficultés pour éviter les étincelles au moment du passage d'une touche à une autre. Le problème est analogue à celui que l'on rencontre dans la construction de réducteurs pour batteries d'ac-

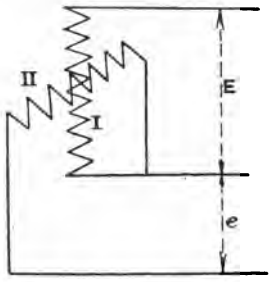


Fig. 71.

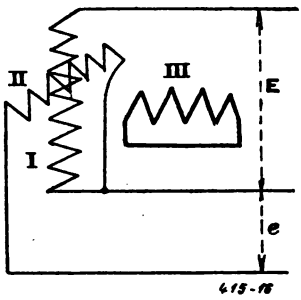


Fig. 72 *a*.

cumulateurs. La solution la plus simple et la plus sûre consiste à employer un organe assurant des ruptures et des contacts très brusques, sans jamais pouvoir s'appuyer sur deux touches à la fois, en supprimant les résistances ou réactances auxiliaires. Une

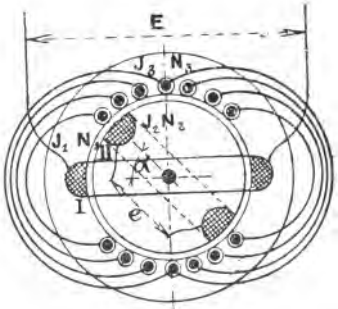


Fig. 72 *b*.

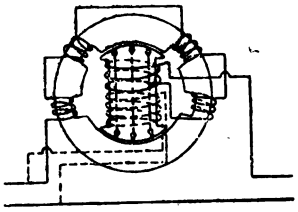


Fig. 73.

autre bonne méthode consiste à employer un interrupteur auxiliaire distinct de la pièce de contact, mais commandé par le mouvement de cette pièce, et disposé de façon que toutes les ruptures et les contacts s'effectuent, non pas sur les balais, mais sur cet interrupteur.

Ce dispositif offre l'avantage que, d'une part, les détériorations ne peuvent se produire que sur une seule partie de

Digitized by Google

l'appareil, et que, d'autre part, on réalise des ruptures beaucoup plus brusques avec un interrupteur qu'avec un dispositif à contacts. Un appareil de ce genre, imaginé par P. Meyer, est représenté schématiquement par les figures 74 et 75. L'interrupteur *f* fait un tour complet quand le contact mobile passe d'une prise de courant e_2 à la prise de courant suivante e_3. Le conducteur *d* est relié aux moteurs.

L'A. E. G. Union a résolu le problème d'une façon radicale en court-circuitant peu à peu les bobines du transformateur auxiliaire au lieu de faire des interruptions.

Pour pouvoir réduire les dimensions du transformateur de démarrage, on choisit des inductions B et des densités de courant très élevées (B = 12.000 à 16.000 pour 25 périodes : $i_s = 3$ à 6 amp. par mm², quand l'appareil ne travaille pas d'une

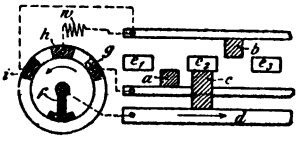


Fig. 74.

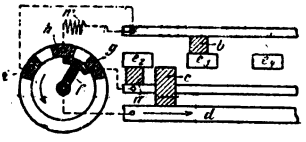


Fig. 75.

façon permanente). En outre, on peut placer ces appareils dans de l'huile avec un récipient extérieur cotelé refroidi par le courant d'air de la marche. Les différents systèmes électriques de commande des trains peuvent être commodément employés pour le démarrage avec les moteurs monophasés. Quand on n'emploie pas le courant d'une source séparée (batterie d'accumulateurs), ou l'air comprimé, pour actionner le démarreur, il y a lieu de feuilleter les électro-aimants de commande. La C^ie^ Westinghouse emploie une série de contacteurs actionnés par un mécanisme électropneumatique dans lequel l'arrivée de l'air comprimé est réglée par des valves commandées électriquement au moyen du courant d'une petite batterie d'accumulateurs.

Il ne faut pas perdre de vue que tous les transformateurs de démarrage abaissent le rendement en marche normale si on les laisse d'une façon permanente en circuit.

Le démarrage des moteurs à répulsion peut être effectué

Digitized by Google

d'une façon rationnelle sans pertes dans des résistances et des transformateurs, par simple décalage des balais ; cette méthode est employée par Brown Boveri et C^ie^ d'après les indications de Déri. Au démarrage, les balais sont placés sur la zone neutre et sont décalés peu à peu au moyen d'une roue à main agissant, par exemple, avec une certaine réduction par l'intermédiaire d'une chaîne sans fin. Dans la disposition adoptée, il y a, en réalité, deux systèmes de balais (fig. 76) placés côte à côte à l'arrêt dans l'axe du flux principal. Suivant le sens de rotation, on déplace l'un ou l'autre système de balais dans l'un ou l'autre sens. Au lieu de décaler les balais,

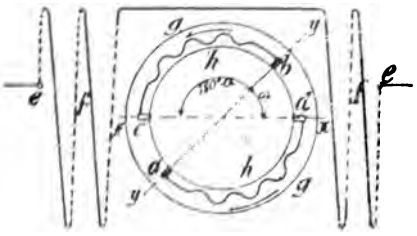


Fig. 76.

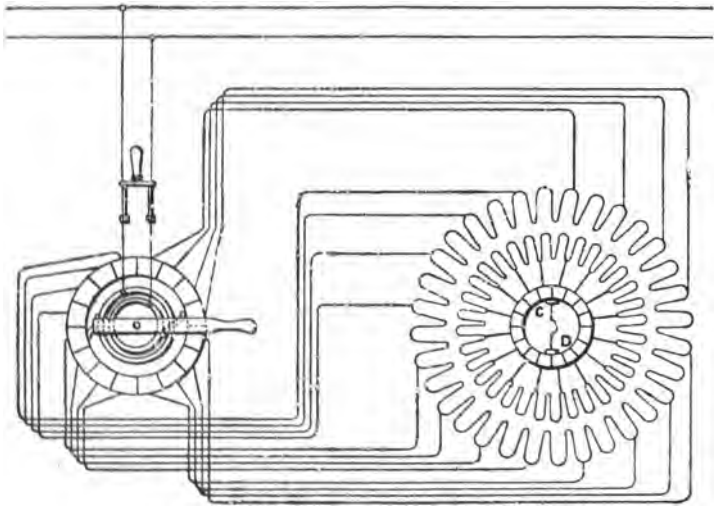


Fig. 77.

on peut aussi, au moyen de prises de courant placées sur l'enroulement statorique, modifier peu à peu le point d'arrivée du courant sur ce dernier (fig. 77), comme l'a indiqué Latour. Le démarreur peut être constitué, par exemple, par un commuta-

Digitized by Google

teur circulaire. D'après Behn Eschembourg, ce dispositif a été breveté en 1893 par les Ateliers d'Oerlikon.

Le renversement du sens de rotation est obtenu par l'échange des conducteurs d'amenée du courant à l'inducteur ou à l'induit. Il est avantageux d'effectuer cet échange de connexions dans un circuit à basse tension, c'est-à-dire, par exemple, en arrière du transformateur (fig. 9 et 10). Le rotor du moteur à répulsion étant court-circuité sur lui-même, une inversion de ce genre n'est pas possible comme dans le moteur série et le moteur compensé. Le renversement du sens de rotation est alors obtenu au moyen des procédés suivants :

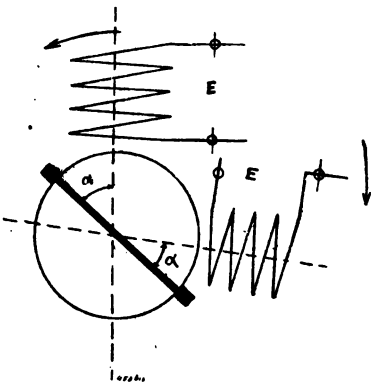


Fig. 78.

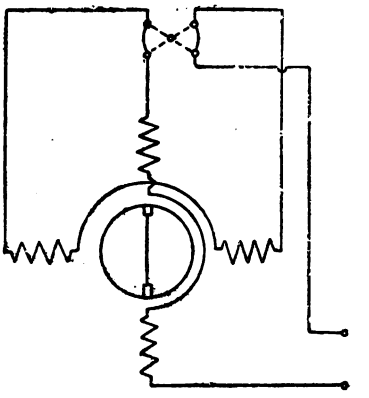


Fig. 79.

a) en décalant les balais de moins de 1/2 pas polaire,

b) en déplaçant de moins de 1/2 pas polaire les connexions de l'enroulement du rotor (fig. 77),

c) en disposant sur le stator deux enroulements (fig. 78) qui peuvent en partie empiéter l'un sur l'autre (fig. 78 et 79, Déri) ; dans ce cas, les balais doivent être calés à un angle $\beta = 45°$ de la zone neutre, ce qui n'est pas la position la plus avantageuse.

VI. — RÉGLAGE DE LA VITESSE

La variation de vitesse lors des variations de charge avec une différence de potentiel constante est, en général, plus forte avec les moteurs à courant monophasé, parce que les

Digitized by Google

saturations sont plus faibles. La méthode pour régler la vitesse consiste à modifier la différence de potentiel aux bornes du moteur ou bien aux bornes de l'induit, ce que l'on obtient au moyen d'un petit transformateur. La vitesse de rotation est directement proportionnelle à la différence de potentiel aux bornes de l'induit et approximativement aussi à la différence de potentiel aux bornes du moteur, pour une intensité de courant constante. Avec le réglage au moyen d'un transformateur série, la vitesse de rotation augmente avec le nombre de tours de l'enroulement secondaire du transformateur série. Naturellement, la vitesse de rotation peut être réglée au moyen de résistances en série, de bobines de self-induction, de groupement en série et en parallèle des différents moteurs, ainsi que par décalage des balais (particulièrement pour le moteur à répulsion). Latour a proposé, pour modifier la vitesse de rotation du moteur compensé, de décaler les balais du rotor, comme l'indique la figure 80. En modifiant les connexions au stator (fig. 77), on peut aussi obtenir des variations de vitesse et de couple.

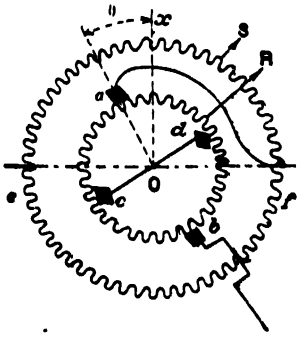


Fig. 80.

Le moteur à répulsion est en état d'infériorité au point de vue de la diversité des moyens de réglage de la vitesse, car, abstraction faite de la méthode de décalage des balais, le réglage ne peut être effectué, en général, que sur le circuit à haute tension, de sorte que les méthodes ordinairement employées en traction électrique peuvent à peine être utilisées. Il est vrai que la méthode de décalage des balais est très simple et facile.

VII. — FREINAGE

Tous les moteurs à collecteur peuvent, au moyen de connexions plus ou moins compliquées, travailler comme générateurs sur des résistances, après avoir été coupés du réseau, ou bien peuvent faire de la récupération en renvoyant du courant sur la ligne. Le freinage rhéostatique des moteurs à cou-

Digitized by Google

rant monophasé est plus énergique et plus sûr que celui des moteurs à courant continu, mais la récupération est moins automatique qu'avec le moteur triphasé. Pour le moteur série, il suffit de le séparer du réseau et de le fermer sur une résistance pour qu'il travaille en génératrice à courant continu ou (fig. 81) comme génératrice à courant monophasé de fréquence variable. Pour le moteur compensé, il faut employer trois résistances W_I, W_{II}, W_{III}, comme l'indique la figure 81 (Eichberg). Pour les deux types de moteur, il faut échanger les connexions entre l'induit et l'inducteur lors du freinage.

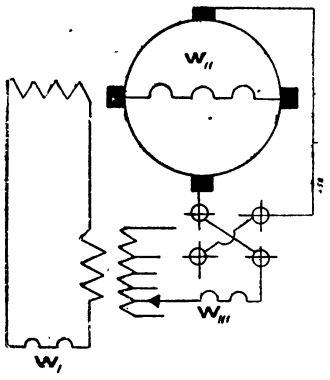


Fig. 81.

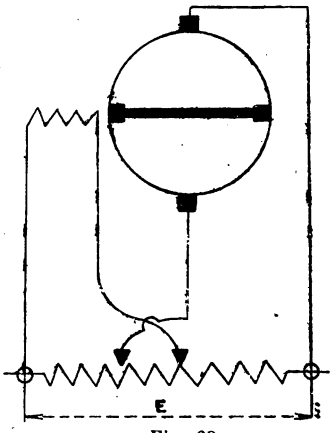


Fig. 82.

Le moteur série à courant monophasé ne peut faire de la récupération que dans des conditions déterminées, comme cela a lieu pour le moteur série à courant continu : cette récupération est obtenue en excitant le moteur séparément sous faible tension, par l'emploi d'un transformateur ou de bornes spéciales du transformateur de réglage (1).

Le moteur compensé également doit, pour pouvoir récupérer, être transformé en moteur shunt, c'est-à-dire avoir, à toutes les charges et à toutes les vitesses, approximativement la même différence de potentiel aux bornes E : la figure 82 représente le montage à adopter pour y parvenir. On alimente

(1) L'induit et l'inducteur sont donc tous deux en dérivation sur le réseau, avec interposition d'un transformateur réducteur.

Digitized by Google

ensuite le rotor et le stator par le même transformateur, et, au moyen de contacts glissants, on fait croître la différence de potentiel aux bornes du stator, pendant que la différence de potentiel aux bornes du rotor diminue par suite de la diminution de vitesse.

Le freinage du moteur à répulsion peut être obtenu simplement, à n'importe quelle vitesse, par décalage des balais ou par déplacement des connexions de l'enroulement statorique (fig. 77); le freinage peut être soit un freinage utile, soit un freinage à contre-marche. Le moteur à répulsion travaille aussi comme frein quand il est fermé, au primaire, sur une résistance : on peut également intercaler une résistance entre les balais.

On peut encore produire le freinage avec un moteur monophasé en le transformant en génératrice à courant continu, ce qui est possible au moyen d'une excitation séparée fournie par une petite dynamo ou une batterie. D'ailleurs, le moteur série ou le moteur à répulsion fermés sur une résistance peuvent travailler comme génératrices à courant continu, s'il existe suffisamment d'aimantation rémanente.

Quand le moteur à répulsion récupère de l'énergie, il emprunte son courant magnétisant au réseau et ce n'est qu'à une vitesse élevée qu'il en produit une partie. Si, pour un calage fixe des balais, on entraîne un moteur à répulsion dans le sens inverse de son sens de rotation, le couple conserve la même direction que dans le bon sens de rotation, c'est-à-dire que le moteur agit comme frein. Le courant J est cependant emprunté au réseau pour les faibles vitesses de rotation, et cela, d'après Steinmetz, jusqu'à ce qu'une vitesse n_x soit atteinte, pour laquelle $\frac{-n_x}{n} = \frac{w_1}{x \sin \beta \cos \beta}$

n_x désignant la vitesse par seconde réduite au cas du moteur bipolaire,
n désignant la fréquence,
w_1 la résistance primaire,
x la réactance du moteur,
β l'angle de calage des balais par rapport à la zone neutre (en bipolaire).

Quand la vitesse de rotation est supérieure à $-n_x$, valeur pour laquelle le courant J est entièrement déwatté, la compo-

Digitized by Google

sante wattée change de sens et le moteur renvoie du courant dans le réseau. Mac Allister a trouvé les résultats suivants dans des mesures faites sur un moteur à répulsion tétrapolaire établi pour une fréquence de 22,5 périodes.

TABLEAU

	GÉNÉRATEUR					MOTEUR			
Vites. de rot^{n}	+2000	+1200	+ 600	+ 200	0	— 200	— 600	—1200	—2000
Couple.....	+ 1	+ 2	+ 7	+ 17	+ 25	+ 29	+ 19	+ 8	+ 4
Courant (1).	+ 9	+ 11	+ 16	+ 22	+ 26	+ 27	+ 22	+ 13	+ 11
cos φ (1)....	+ 48	+ 65	+ 82	+ 70	+ 48	+ 5	— 65	— 98	—88%

VIII. — PERTES

Les pertes dans le cuivre de l'inducteur et de l'induit ne devraient pas s'écarter beaucoup de celles d'un moteur correspondant à courant continu ou à courants triphasés, quoique le facteur de puissance soit inférieur à l'unité. Mais cependant, les pertes suivantes sont plus considérables :

1° *Les pertes dans le fer*, car elles se produisent aussi dans le rotor et correspondent à la fréquence n du réseau ; en outre, dans le moteur série, les pertes dans le fer de l'induit dépendent de n_r, quand on a $n_r > n$, n_r désignant la vitesse de rotation par seconde $\frac{up}{60}$.

Dans le moteur à répulsion et le moteur compensé, les pertes dans le fer de l'induit disparaissent au synchronisme, car il se produit un champ tournant avec la vitesse de rotation de l'induit, c'est-à-dire fixe dans l'espace. Au voisinage du synchronisme, les pertes dans le fer de l'induit sont proportionnelles seulement au glissement n_s par rapport au synchronisme n.

(1) Le produit du courant par cos φ est proportionnel à la puissance absorbée (+) ou la puissance fournie (—).

Digitized by Google

Dans tous les moteurs monophasés à collecteur, les pertes dans le fer du stator et du rotor sont proportionnelles à n à l'arrêt, c'est-à-dire ont une valeur assez élevée, contrairement aux pertes dans le moteur à courant continu, qui sont nulles. Les pertes dans le fer au démarrage peuvent être diminuées par une diminution de la différence de potentiel de démarrage.

2° Les pertes dans le fer produites par le *flux transversal :* ces pertes sont assez importantes, dans le moteur série, et ne doivent être sensibles qu'au démarrage dans le moteur à répulsion et le moteur compensé.

3° Les pertes dans les *bobines court-circuitées* par les balais, pertes qui ne sont pas négligeables dans le moteur série, surtout quand on emploie des résistances joignant les bobines aux lames du collecteur, mais qui n'entrent en ligne de compte qu'au démarrage et aux vitesses hypersynchrones dans le moteur à répulsion ou le moteur compensé.

En fait, le rendement des moteurs monophasés à collecteur est de 3 à 10 % inférieur à celui des moteurs à courant continu ou à courants triphasés de même puissance, de sorte que ces derniers sont plus économiques dans tous les cas où les démarrages sont peu fréquents tandis que, dans les cas de démarrages fréquents, l'avantage revient aux moteurs monophasés à collecteur, en ce qui concerne la puissance totale dépensée pendant le démarrage. Dans le moteur lui-même, cependant, les pertes sont plus élevées que dans le moteur à courant continu, ce qui provoque un échauffement plus considérable.

IX. — COMMUTATION DANS LES DIFFÉRENTS MOTEURS

Autant que l'on peut en juger, les grandes maisons de construction n'emploient, parmi les différents types de moteurs monophasés, que les deux types suivants :

Le moteur série avec *bobine transversale.*

Le moteur série avec des *balais transversaux* (1), (balais de court-circuit).

(1) Moteur Latour, Winter-Eichberg, généralement appelé moteur à répulsion compensé.

Digitized by Google

Le moteur à répulsion, quoiqu'il soit le plus simple des moteurs à collecteur, n'a trouvé jusqu'à présent aucun emploi pratique dans les applications de traction électrique, parce que le moteur compensé, tout à fait analogue comme principe et comme mode de fonctionnement, offre des avantages importants au point de vue du facteur de puissance, du choix de l'entrefer et des possibilités de réglage.

Le moteur série à bobine transversale est plus avantageux, en ce qui concerne le facteur de puissance et la commutation, aux faibles fréquences (5 à 25) et aux vitesses de rotation élevées, ainsi qu'avec un faible entrefer. Quand la fréquence diminue, il se rapproche de plus en plus du moteur série à courant continu, pour lequel la fréquence est nulle.

Le moteur compensé, qui agit comme moteur d'induction dans l'axe des balais court-circuités, travaille dans les meilleures conditions relatives aux fréquences assez élevées (20 à 50), aux faibles vitesses de rotation et avec un grand entrefer : sa commutation est particulièrement mauvaise pour la marche au delà du synchronisme et à de basses fréquences, pour une marche très au-dessous du synchronisme.

Le moteur à répulsion cesse de fonctionner pour une fréquence nulle, tandis que le moteur compensé, tant qu'il n'est pas accompagné d'un transformateur de réglage, se transforme de lui-même, comme le moteur série, en moteur à courant continu : dans ce cas, toute son action d'induction caractéristique dans l'axe des balais court-circuités disparaît.

Le moteur série avec bobine transversale est muni, par différents constructeurs, de pôles de commutation qui, d'ailleurs, peuvent être employés aussi avec les autres moteurs monophasés. L'excitation de ces pôles de commutation peut être faite en série ou en shunt, cette dernière disposition étant souvent plus avantageuse, car la tension résultante Σe dans les bobines court-circuitées n'est pas proportionnelle au courant principal. Cette tension Σe des bobines placées sous les balais est la somme d'une f. é. m. e_i induite par action statique, d'une f. é. m. produite par la rotation e_r, et de la tension de réactance e_R : la fréquence et la forme de ces f. é. m. sont très différentes, de sorte qu'on ne devrait pas les additionner algé-

Digitized by Google

briquement. La valeur Σe (1) tombe, dans tous les moteurs à collecteur, d'après la figure 83, d'un maximum correspondant au démarrage à un minimum correspondant au voisinage du synchronisme ou un peu au delà de celui-ci, et croît à nouveau quand la vitesse continue à croître. Dans le moteur série à balais en court-circuit (2), le minimum (fig. 83, courbe II $= \Sigma e$) est égal à la tension de réactance e_R et par suite sensiblement plus faible que dans le moteur série à bobine transversale (fig. 83, courbe I $= \Sigma e$).

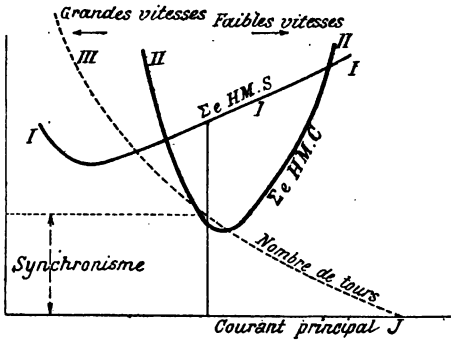


Fig. 83. — Tension d'étincelles Σe pour le moteur série à bobine transversale (H M. S) et pour le moteur compensé (H M. C).

Au contraire, l'allure de la courbe Σe est plus aplatie dans le moteur série à bobine transversale, c'est-à-dire, que Σe a des valeurs plus favorables pour le moteur série à bobine transversale au-dessous du synchronisme et surtout au delà du synchronisme. L'angle de décalage entre e et le courant principal J varie entre 90° environ à l'arrêt jusqu'à 0° environ aux vitesses de rotation élevées; l'angle de décalage entre Σe et la différence de potentiel aux bornes E_K varie aussi assez fortement avec la vitesse.

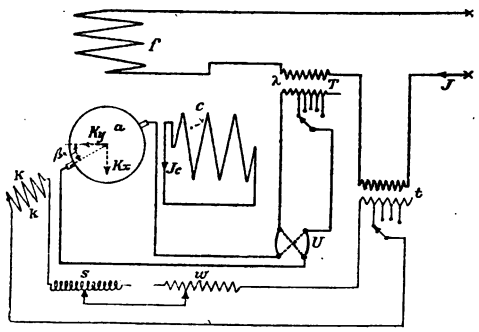


Fig. 84. — Moteur série à bobine transversale : f, flux; T, transformateur série pour l'induit a; c, bobine transversale; k, pôle de commutation; s, résistance inductive ou capacité; w résistance ohmique; U, commutateur; t, transformateur pour k.

(1) Voir Punga « Les étincelles dans les moteurs à collecteur ».
(2) Dans ce moteur, la commutation ne présente des difficultés qu'aux balais court-circuités : dans la bobine en court-circuit des balais d'excitation, il n'intervient, comme dans un moteur à courant continu, que la tension de réactance e_R.

Digitized by Google

On voit donc qu'il est extrêmement difficile d'obtenir une compensation exacte automatique de la tension de court-circuit Σe en employant des pôles auxiliaires, et que la question est beaucoup plus complexe que dans le cas de machines à courant continu. Le courant d'excitation des pôles auxiliaires doit être réglé en grandeur et en phase au moyen d'un transformateur à nombre de bobines variable, ainsi qu'au moyen de résistances inductives et non inductives, sans qu'il existe de relation simple entre ce réglage et la valeur du courant principal. Dans le moteur série à balais en court-circuit, il faut inverser le courant d'excitation au synchronisme, puisque Σe change de signe.

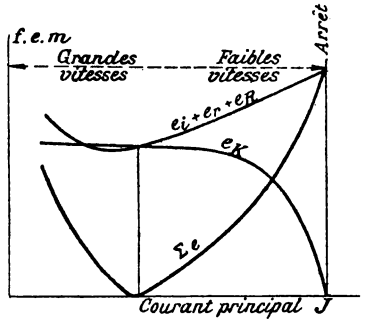


Fig. 85. — Tension d'étincelles pour le pôle de commutation excité par le courant principal (moteur série à bobine transversale).

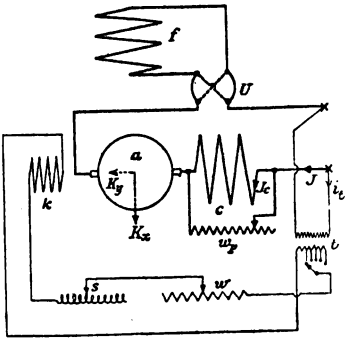


Fig. 86. — Moteur série à bobine transversale : mêmes notations que fig. 84.

Si l'on excite les pôles auxiliaires k par le courant principal (figure 84), directement ou en intercalant un transformateur série t, la f. é. m. compensatrice produite par la rotation [1] $e_k \equiv n_r J$ a l'allure indiquée par la figure 85 ($n_r = \frac{ur}{60}$; u = nombre de tours par minute; p = nombre de paires de pôles) tant que, pendant le fonctionnement, le circuit des pôles auxiliaires n'est pas modifié. L'angle de décalage entre e_k et $[e_i] + [e_r] + [e_R]$ varie avec J : comme force électromotrice résultante dans la bobine court-circuitée par les balais, on trouve $\Sigma e = [e_k] + [e_i] + [e_r] + [e_R]$: cette force électromotrice résultante Σe est tracée sur la figure 85. A chaque instant, la formation d'étincelles dépend de cette grandeur Σe.

[1] Le signe $\equiv$ signifie approximativement égal.

Digitized by Google

Si l'on excite les pôles auxiliaires en dérivation (fig. 86), la f. é. m. compensatrice $e_k \equiv n_r E_K$ pour une différence de potentiel aux bornes E_K constante varie comme l'indique la figure 87 et l'on obtient pour la tension produisant les étincelles $\Sigma e = [e_k] + [e_i] + [e_r] + [e_R]$ la courbe tracée sur la figure 87, pour laquelle il y a lieu de remarquer que l'angle de décalage entre e_k et E_K, ainsi qu'entre e_k et $[e_i] + [e_r] + [e_R]$ varie fortement avec le courant J. Tant que l'on n'inverse pas, au voisinage du synchronisme, le courant d'excitation des pôles auxiliaires d'un moteur série à balais en court-circuit, la valeur de Σe, dans un intervalle de vitesses déterminé, est plus grande (plus mauvaise) que $[e_i] + [e_r] + [e_R]$.

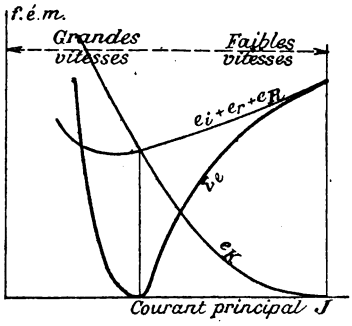


Fig. 87. — Tension d'étincelles pour le pôle de commutation excité en dérivation (moteur série à bobine transversale).

Au démarrage, on n'obtient aucune compensation avec les pôles auxiliaires simples dont il a été question jusqu'ici, car

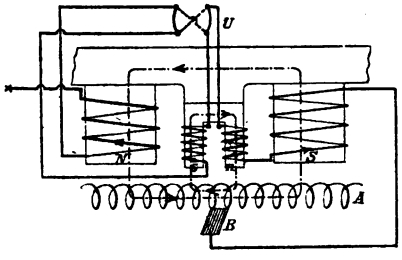


Fig. 88.

la f. é. m. compensatrice e_k dépend toujours de la vitesse de rotation n_r. On peut obtenir une compensation à l'arrêt en employant des pôles auxiliaires doubles (fig. 88) tels que ceux employés par Zani (Dick, Kerr et C°). Le pôle auxiliaire double *ns* excité par un courant proportionnel au courant principal induit par induction statique (*n* étant la fréquence du réseau) une f. é. m. compensatrice $e_k \equiv n.J$ qui peut neutraliser complètement la f. é. m. e_i induite par le flux principal. L'allure de e_k, ainsi que celle de la tension

$$\Sigma e = [e_k] + [e_i] + [e_r] + [e_R]$$

sont représentées sur la figure 89. Aux vitesses élevées, ce

Digitized by Google

pôle auxiliaire n'agit plus d'une façon efficace : on peut, au moyen d'un commutateur u, le connecter de telle façon qu'il se transforme en pôle simple, c'est-à-dire de façon que ses deux noyaux aient la même polarité : on a alors $e_k \equiv n_r$ J. Dans ce cas, la f. é. m. compensatrice Σe a l'allure indiquée sur la figure 90, et la tension Σe résultante a une valeur très favorable. Le pôle auxiliaire double peut aussi être excité par un enroulement auxiliaire particulier intercalé entre l'induit et le collecteur. Il faut remarquer cependant que la construction de ces pôles doubles offre de grandes difficultés, en pratique, parce qu'ils ne doivent agir que sur les bobines court-circuitées.

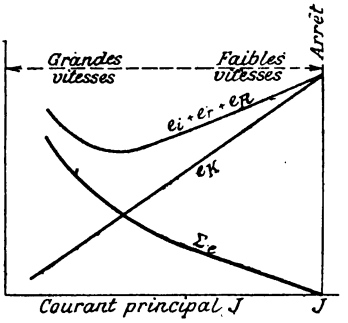


Fig. 89. — Tension d'étincelles pour un pôle auxiliaire double.

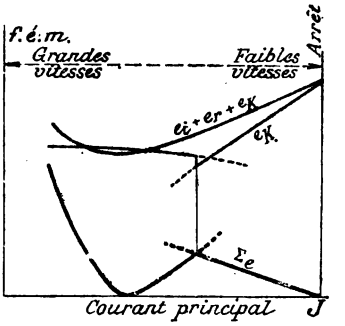


Fig. 90. — Tension d'étincelles pour un pôle auxiliaire double avec inversion.

Dans ce qui suit nous indiquerons, en tenant compte des tensions de dispersion et de la réaction des bobines court-circuitées par les balais, les bases nécessaires au calcul pour les deux types de moteurs les plus importants :

1. — *Moteur série à bobine transversale* (fig. 86).

Dans le moteur représenté par la figure 86, la bobine transversale c est en série avec l'induit a et avec l'inducteur ; elle peut aussi être court-circuitée sur elle-même sans que rien soit changé aux considérations qui suivent. Le pôle de commutation k est relié à un transformateur réglable t : le courant d'excitation est, en outre, réglé par la self-induction s

Digitized by Google

et la résistance w. Le diagramme le plus général et le plus exact pour le montage représenté par la figure 86 est tracé sur la figure 91 pour une faible vitesse de rotation et un couple important et sur la figure 92 pour une vitesse élevée et un couple faible. Soient

$2p$ le nombre de paire de pôles,

$u = 60\frac{n_r}{r}$ la vitesse de rotation par minute,

E_K la différence de potentiel aux bornes,

K_x le flux dans la direction de l'axe du champ inducteur,

K_y le flux perpendiculaire à ce dernier dans l'espace,

Z_f le nombre de conducteurs inducteurs répartis en $2a$ circuits parallèles (généralement $2a = 1$),

Z_a le nombre de conducteurs induits répartis en $2b$ circuits parallèles,

$$Z'_f = \frac{Z_f}{2a} \quad ; \quad Z'_a = \frac{Z_a}{2b}.$$

On a, pour le flux K_x :

$$K_x = 1{,}26\Lambda_x[(AW_f \pm AW_g)] + [(AW_b)] = 1{,}26\Lambda_x AW_r \qquad (1)$$

où : $AW_f = k\frac{1{,}4JZ_f}{8ap}$ ampère-tours inducteurs maxima par pôle.

($k = 1$ à $0{,}7$ d'après l'enroulement ; J est le courant principal, abstraction faite des pertes dans le fer et par frottements).

$AW_g = \frac{2\beta}{180} AW_a = \frac{2\beta}{180} \frac{1{,}4JZ_a}{8bp}$ = contre-ampère-tours de l'induit dans le double de l'angle β que fait la ligne des balais avec la ligne neutre (fig. 84).

$AW_b = 0{,}1\Sigma e \frac{fz_s}{w_k}$ = réaction des ampère-tours dans la bobine court-circuitée par les balais.

(Σe désigne la somme des f. é. m. dans la bobine court-circuitée, construite dans les fig. 91 et 92 avec e, $e_r + e_R$ et e_k ; f, le nombre des lames couvertes par balai ; z_s le nombre des tours par lame ; W_k la résistance par ligne de balais).

La direction des ampère-tours AW_b est parallèle à Σe : les ampère-tours $(AW_f \pm AW_g)$ doivent être composés géométriquement avec AW_b (figure 91).

La perméabilité Λ_x du circuit magnétique pour le flux K_x est donnée par la formule $\Lambda_x = k' \frac{\text{section d'air}}{\text{entrefer } \delta}$ dans laquelle le

Digitized by Google

coefficient k' a une valeur comprise entre 0,8 et 0,9 et tient compte de la réluctance magnétique dans le fer : la valeur de k' diminue quand le courant augmente : pour cette raison il est bon de tracer la courbe du flux K_x en fonction des ampère-tours $[(AW_f + AW_g)] + [AW_b.]$ c'est-à-dire la caractéristique à vide.

On a en outre : $e_i = 4{,}44 n z_k k_x 10^{-8}$ avec une direction perpendiculaire à K_x

(n désigne la fréquence du réseau ; z_k le nombre de tours court-circuités par chaque ligne de balais),

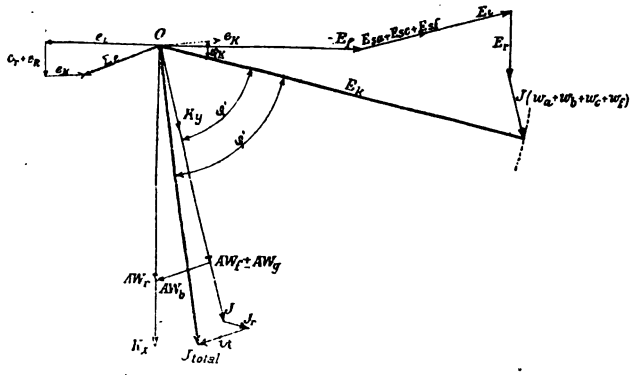


Fig. — 91. Diagramme du moteur série avec bobine transversale pour de faibles vitesses.

$$e_r = e'_r n_r z_k K_y 10^{-8}$$

$$\left(e'_r \equiv \frac{2\pi}{\sqrt{2}} = 4{,}44 \quad ; \quad K_y = \text{flux dans l'axe des balais}\right).$$

La tension de réactance e_R dans le groupe de bobines court-circuité est à peu près en phase avec e_r et peut, pour un enroulement ondulé, être calculée en première approximation au moyen de la formule $e_R = f.\frac{v_k}{s_b}\left(\frac{Z^2}{2k}\right)[15 l_e + 3\tau]\frac{J}{2b} 10^{-8}$ [1] $\equiv 12\left(\frac{Z}{2k}\right) f v l_e AC$

(f désigne le nombre de lames couvertes par balai ; v_k la vitesse périphérique du collecteur ; s_b l'épaisseur des balais ; $\frac{Z}{2k}$ le nombre de tours par lame ; l_e la longueur active du fer ; τ le pas polaire ; v la vitesse périphérique de l'induit ; AC le nombre d'ampère-conducteurs par centimètre de périphérie).

---

[1] Les nombres 15, 12, et 3 dépendent beaucoup des divers éléments du projet.

Digitized by Google

En employant des pôles auxiliaires, on double à peu près la valeur de e_R. La grandeur de la f. é. m. e_k produite par les pôles k est $e_k = c_k n_r z_k K_k 10^{-8}$

($c_k \equiv \frac{2\pi}{\sqrt{2}}$; K_k est le flux du pôle auxiliaire, facile à calculer d'après le courant d'excitation correspondant $i_k = ci_t$, le nombre de tours, et les dimensions du circuit magnétique).

Tant que le fer n'est pas saturé, on a $e_k \equiv n_r i_t$. La phase de e_k dépend de ce que le pôle auxiliaire est excité par le courant principal (fig. 87) ou par un courant dérivé (fig. 84), ainsi que de la résistance apparente du circuit du pôle auxiliaire. En appelant δ' l'entrefer du pôle auxiliaire, on a, pour le nombre d'ampère-tours nécessaire sur ce pôle, l'expression

$$AW = AW_a \frac{90 - \beta}{90} - AW_c + 0{,}8 B_k \delta' \gamma$$

(B_k désigne l'induction dans le pôle auxiliaire; γ un coefficient, égal approximativement à 1,2, qui tient compte de la réluctance du fer; AW_a et AW_c ont des valeurs dont il sera question plus loin).

Le flux K_y est donné par l'expression

$$K_y = 1{,}26 \Lambda_y \left(AW_a \frac{90 - \beta}{90} - AW_c \right).$$

[$AW_a = \frac{1{,}4 J Z_a}{8bp} k$ désigne les ampère-tours de l'induit; $AW_c = 1{,}4 \frac{J_c Z_c}{8b'p} k$ désigne les ampère-tours de l'enroulement compensateur ayant Z_c conducteurs et $2b'$ branches parallèles ($2b' = 1$ en général).

En pratique il faut avoir, autant que possible,

$$AW_c = AW_a \frac{90 - \beta}{90}.$$

Si l'enroulement c est court-circuité sur lui-même, on obtient pour AW_c, abstraction faite de la dispersion et de la résistance ohmique, une valeur égale à celle de AW_a, de sorte que le flux K_y est nul. Le facteur d'enroulement k est généralement plus grand pour AW_c que pour AW_a. Le terme Λ_y de la formule désigne la perméabilité magnétique pour le flux K_y.

Comme le montrent les figures 91 et 92, la différence de potentiel aux bornes E_K est la somme géométrique d'une série de forces électromotrices :

Digitized by Google

1°) $E_f = c_f\, n\, Z'_f\, K_x\, 10^{-8}$ perpendiculaire à K_x

(c_f est un facteur de tension et est compris entre 1,4 et 2,2)

2°) $E_i = c\ \ n\, Z'_a K_{\ y}\, 10^{-8}$ perpendiculaire à K_y et à J $\left(c_i \equiv \frac{2}{\sqrt{2}}\right)$

3°) Trois tensions de dispersion $E_{sa} + E_{sc} + E_{sf}$ perpendiculaires à J.

La tension de dispersion E_{sa} dans l'induit est approximativement donnée par la formule

$$E_{sa} = \frac{nZ'^2_a}{p}(5l_e + 1{,}5\tau)\frac{J}{2b}\,10^{-8},$$ (en appelant τ le pas polaire).

La tension de dispersion E_{sc} dans l'enroulement compensateur est de même

$$E_{sc} = \frac{nZ'^2_c}{p}(6l_e + 1{,}5\tau)\frac{J_c}{2b'}\,10^{-8},$$

$\left(\text{en posant } Z'_c = \frac{Z_c}{2b'}\right)$.

La tension de dispersion dans l'enroulement inducteur pour des pôles saillants est approximativement

$$E_{sf} = 2n\frac{Z'^2_f}{p}\,\frac{hl}{P-\tau}\,\frac{J}{2a}\,10^{-8}$$

(h désigne la hauteur radiale du pôle ; l la longueur axiale ; P l'arc polaire).

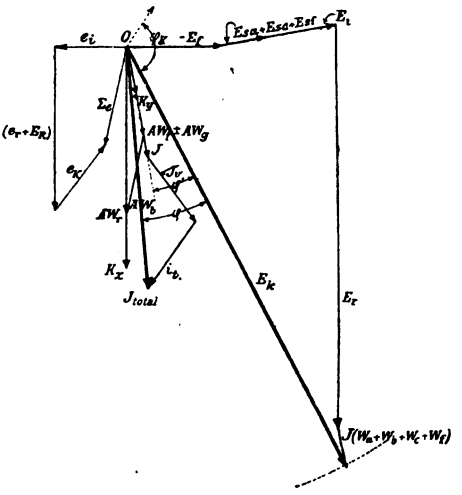


Fig. 92. — Diagramme du moteur série à bobine transversale pour des vitesses élevées.

Pour un enroulement inducteur réparti dans des encoches, la formule donnant E_{sf} prend la même forme que celle de E_{sa} ou de E_{sc} : il suffit de remplacer Z'_a par Z'_f.

4°) Aux balais de l'induit il existe, par suite de la rotation, une tension $E_r = c_r n_r Z'_r\, K_x\, 10^{-8}$ dirigée suivant K_x

$\left(\text{dans cette expression, } c_r \equiv \frac{2}{\sqrt{2}}\right)$.

5°) Enfin, dans la direction du courant J, il y a encore les chutes ohmiques Jw_a dans l'induit, Jw_b dans les balais, Jw_c dans l'enroulement compensateur, et Jw_f dans l'enroulement inducteur.

Digitized by Google

Au courant J, il faut ajouter une portion (1)

$$J_v = \frac{\text{Pertes dans le fer + pertes par frottements en watts}}{E_K},$$

dont la direction est celle de E_K, ainsi que le courant d'excitation i_t du pôle auxiliaire k, pour obtenir le courant total absorbé J_{tot} et l'angle de décalage entre le courant J_{tot} et E_K.

Si l'on emploie le montage représenté par la figure 84 avec un transformateur série T, une bobine de compensation court-circuitée c et un transformateur auxiliaire t traversé par le courant principal et servant à l'excitation du pôle auxiliaire k, le diagramme des figures 91 et 92 reste absolument valable en principe.

Toutefois, en appelant λ le rapport de transformation du transformateur T, on doit prendre, au lieu de E_{sa}, E_r et $J(w_a + w_b)$ les termes λE_{sa}, λE_r et $\lambda J(w_a + w_b)$. On a de plus $E_i = 0$ et $i_t = 0$: il se produit au transformateur t une chute de tension E_t dont la grandeur et la phase dépendent du circuit du pôle auxiliaire, ainsi que de la résistance ohmique et inductive du transformateur. Aux tensions de dispersion s'ajoute celle du transformateur T, et la chute ohmique totale de ce transformateur est à ajouter à $J[(w_a + w_b)\lambda + w_c + w_f]$.

Si, dans le dispositif de la figure 84, on bobine l'enroulement inducteur pour haute tension, on ne doit pas intercaler l'enroulement compensateur dans le circuit de l'induit, mais le court-circuiter sur lui-même, car, sinon, il y a sur le stator des conducteurs voisins à haute et basse tension.

Le *couple* du moteur série à bobine transversale est, en moyenne, pour le cas général (figure 84),

$$M = 2{,}3\,\lambda p\, Z'_a K_r J 10^{-6}, \text{ en kilogrammètres,}$$

ou approximativement :

$$M = 2{,}3 p Z'_a \frac{E_K}{\sqrt{(c_f n Z'_f)^2 + (\lambda c_r n_r Z'_a)^2}} \lambda J 10^{+2}.$$

Le couple de démarrage, pour $n_r = 0$, est

$$M^a = 230 \frac{Z'_a}{C_f Z'_f} \frac{p}{n} \lambda J E_k = C\lambda \frac{p}{n} J E_K,$$

(1) Dans la figure 10, il y a lieu de remplacer $e_r + E_r$ par $e_r + e_{r'}$ et j_v doit être parallèle à E_K.

Digitized by Google

On voit donc que le couple de démarrage est proportionnel aux volts-ampères primaires, au rapport du nombre de paires de pôles à la fréquence, et au rapport de transformation du transformateur série.

Considéré en lui-même, le moteur série à bobine transversale peut posséder un nombre quelconque de pôles, sans qu'il soit tenu compte de la fréquence n, comme cela est le cas général pour les moteurs à courant continu ; le facteur de puissance $\cos \varphi$ n'est pas modifié sensiblement quand on modifie le nombre de pôles dans un projet de moteur, le diamètre et la longueur de l'induit, la vitesse de rotation et la valeur de l'entrefer restant les mêmes. Cependant, il est avantageux d'établir le moteur série avec un nombre de pôles relativement élevé, tel que p soit compris entre $90\frac{n}{u}$ et $120\frac{n}{u}$ de façon à réaliser le maximum d'économie. En outre, pour un diamètre extérieur donné, on peut de cette façon augmenter le diamètre de l'induit et diminuer sa longueur axiale, ce qui diminue la dispersion et la tension de réactance et améliore le facteur de puissance. Enfin, le flux par pôle étant plus faible, la tension e_i induite statiquement dans les bobines court-circuitées est plus faible et rend la commutation meilleure, surtout au démarrage.

II. — *Moteur série à balais transversaux*

Si l'on ajoute au rotor du moteur série simple sans bobine transversale (fig. 93) un système de balais court-circuité sur lui-même *cc* perpendiculaire au système de balais excitateurs *aa*, le fonctionnement du moteur est caractérisé par le diagramme de la figure 94 pour de faibles vitesses de rotation, et par le diagramme de la figure 95 pour des vitesses de rotation élevées : à proximité du synchronisme, la figure 94 se transforme en la figure 95, ce qui ne se produit pas pour le moteur série à bobine transversale. On suppose que le flux K_y dans la direction des balais d'excitation *aa*, est toujours perpendiculaire, non seulement dans l'espace mais aussi dans le temps, au flux K_x dans la direction des balais transversaux *cc*, ce qui en réalité n'est pas tout à fait exact.

On trouve de la façon suivante la relation entre K_y et K_x :

Digitized by Google

Aux balais *cc* il apparaît, par suite de la rotation, une f. é. m.

$$E_{rc} = c'_r n_r Z'_a K_y 10^{-8}, \qquad (1)$$

qui correspond, par induction statique dans l'enroulement inducteur *f*, à une f. é. m.

$$E'_r = c_f n Z'_f K_x 10^{-8}. \qquad (2)$$

En rapportant E_{rc} à l'enroulement *f*, on obtient

$$E'_r = E_{rc} \frac{Z'_f}{Z'_a} \cdot \frac{c_f}{c'_a} = c_f n_r Z'_f K_y 10^{-8}, \qquad (3)$$

et, d'après les équations (2) et (3),

$$K_x = \frac{n_r}{n} K_y. \qquad (4)$$

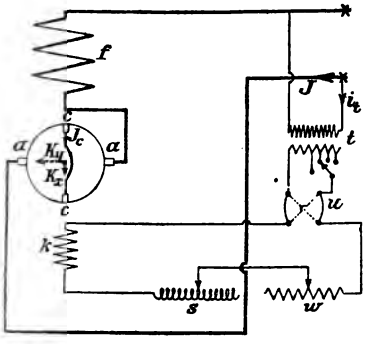


Fig. 93. — Moteur compensé à balais transversaux.

Sur la figure 94 (en bas à gauche) et sur la figure 95 (en haut à droite), on a tracé les f. é. m. e_i, e_R, e_r, e_k, et Σe dans les bobines court-circuitées par les balais. Les ampère-tours de réaction de ces bobines AW_b sont parallèles à Σe, et leur valeur est facile à trouver au moyen des formules précédentes; de même, les formules établies s'appliquent au calcul de e_i, e_R, e_r, pourvu qu'on remarque simplement que *e* est produit par le flux K_y et e_r par le flux K_x. Les ampère-tours de l'induit dans la direction *aa* ont la valeur suivante :

$$AW_y = \frac{1,4JZ_a}{8bp}. \qquad (5)$$

Leur direction est celle du courant J. La somme géométrique des ampère-tours AW_b et AW_y donne une résultante AW_r dans la direction de *aa*. Les ampère-tours résultants produisent le flux

$$K_y = 1,26 AW_r \Lambda_y. \qquad (6)$$

La relation entre K_y et AW_r peut avantageusement être repré-

Digitized by Google

sentée par la caractéristique à vide. On a approximativement :

$$\Lambda_y = \frac{q}{\delta} = \frac{\text{section d'air}}{\text{entrefer}}.$$

La détermination du flux K_x peut être faite comme pour les transformateurs : les ampère-tours AW_μ qui produisent ce flux ont la direction de K_x. Si l'on désigne par AW_f les ampère-tours de l'enroulement inducteur f dans la direction de J, et par AW_c ceux de l'enroulement du rotor dans la direction cc, les trois grandeurs AW_f, AW_c, et AW_μ forment à peu près un triangle rectangle (fig. 94 et 95). Les ampère-tours AW_μ sont donnés par la formule

$$K_x = 1{,}26\, AW_\mu \Lambda_x, \quad (7)$$

et les ampère-tours AW_f par la formule

$$AW_f = \frac{1{,}4 J Z_f}{8ap} k. \quad (8)$$

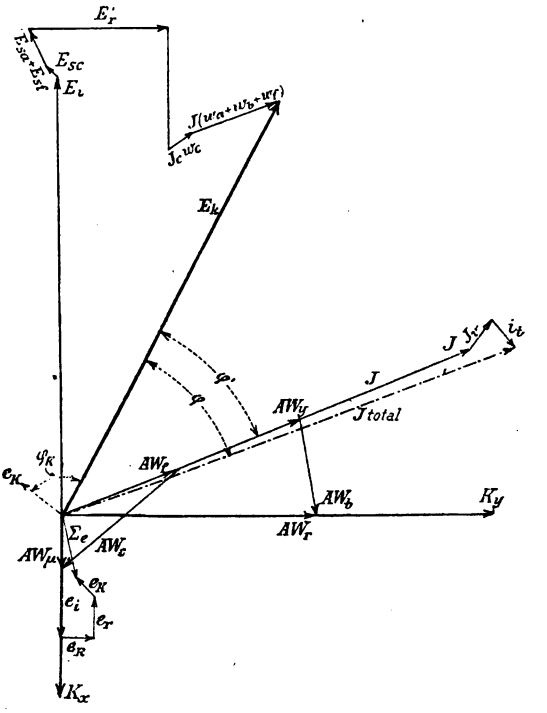


Fig. 94. — Moteur compensé à balais transversaux. Faibles vitesses, courant décalé en arrière.

Si le courant magnétisant dans l'axe cc du rotor est J_μ, on a :

$$AW_\mu = \frac{1{,}4 J_\mu Z_a}{8bp} k' = \frac{K_x}{1{,}26 \Lambda_x} = \frac{n_r}{n} \frac{\Lambda_y}{\Lambda_x} AW_r \quad (9)$$

Tant que l'on peut poser $AW_b = 0$ et $\Lambda_x = \Lambda_y$, on a :

$$J_\mu = \frac{n_r}{n} J. \quad (10)$$

La formule $AW_c = \frac{1{,}4 J_c Z_a}{8ap} k'$ permet de calculer le courant J_c dans l'enroulement du rotor dans l'axe cc.

Digitized by Google

La grandeur et la direction de la différence de potentiel aux bornes est la somme des composantes suivantes :

1°) $E_i = c_i n Z'_a K_y 10^{-8}$ perpendiculaire à K_y. (11)

2°) Les trois tensions de dispersion :

E_{sa} de l'enroulement du rotor dans la direction aa, proportionnelle à JZ_a;

E_{sf} de l'enroulement inducteur proportionnelle à JZ_f;

E_{sc} de l'enroulement du rotor dans la direction cc proportionnelle à $J_c Z_a$ et rapportée à l'enroulement f.

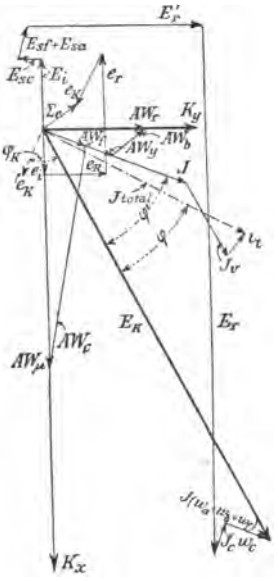


Fig. 95. — Moteur compensé à balais transversaux. Vitesses élevées : courant décalé en avant.

Les grandeurs de ces tensions sont déterminées comme précédemment : en ce qui concerne leurs directions, $(E_{sa} + E_{sf})$ est perpendiculaire à J ; E_{sc} est perpendiculaire à J_c ou à AW_c.

3°) $E'_r = c_f n_r Z'_f K_y 10^{-8}$ parallèle à K_y. (12)

4°) $E_r = c_r n_r Z'_a K_x 10^{-8}$ parallèle à K_x. (13)

5°) La chute ohmique de tension $J(w_a + w_b + w_f)$ dans le rotor (direction aa) et dans l'inducteur f, ainsi que la chute $J_c w_c$ dans le rotor (direction cc) rapportée à l'enroulement f. La chute de tension J $(w_a + w_b + w_f)$ est parallèle à J ; la chute de tension $J_c w_c$ est parallèle à J_c ou à AW_c.

En ajoutant au courant J, pour les pertes dans le fer et par frottements, le courant J_v parallèle à E_K et le courant i_t parallèle à e_k pour les pôles auxiliaires k, on obtient le courant total J_{tot} et l'angle de décalage φ entre E_K et J_{tot}.

Les figures 94 et 95 montrent avant tout que l'influence des bobines court-circuitées (AW_b) rend plus mauvais le facteur de puissance dans le moteur série à balais transversaux pour la marche au delà du synchronisme et ne l'améliore que pour la marche en deçà du synchronisme : au contraire, dans le moteur série à bobine transversale, cette influence améliore toujours le facteur de puissance.

Si l'on emploie pour l'alimentation des balais du rotor aa un

Digitized by Google

transformateur série ayant un rapport de transformation λ, avec un montage analogue à celui employé pour le moteur série avec bobines transversales, on doit prendre, dans le diagramme, les grandeurs λE_i, λE_r, λE_{sa}, $\lambda J(w_a + w_b)$ au lieu de E_i, E, E_{sa}, $J(w_a + w_b)$ et ajouter, dans la somme des f. é. m. e donnant la différence de potentiel E_K, la chute de tension totale E_t dans le transformateur série faisant un certain angle avec J.

Le *couple* du moteur série à balais transversaux est, en général, donné par l'équation :

$$M = 2{,}3p[K_y . JZ'_f \cos(K_y J) + K_x JZ'_f \cos(K_x J)]10^{-6}. \qquad (14)$$

Comme, pour $AW_b = 0$, on a aussi $\cos(K_x J) = 0$ et $\cos(K_y J) = 1$, on a approximativement

$$M = 2{,}3pK_y JZ'^2_f 10^{-6}. \qquad (15)$$

Dans le cas le plus général, c'est-à-dire quand on emploie un transformateur série pour l'axe $a\,a$ du rotor et un rapport de transformation λ, on a, en négligeant les valeurs Jw et E'_s :

$$K_y = \frac{E_K 10^8}{\sqrt{n^2 Z'^2_a \lambda^2 2 \left(c_f - c_r \frac{n^2_r}{n^2}\right)^2 + (c_f n_r Z'_f)^2}} \qquad (16)$$

de sorte que, dans ce cas, comme pour le moteur série avec bobine transversale, on a

$$M = \frac{2{,}3pE_K JZ'_f 10^2}{n\sqrt{Z'^2_a \lambda^2 2 \left[c_f - c_r \left(\frac{n_r}{n}\right)^2\right]^2 + (c_f n_r Z'_f)^2}}. \qquad (17)$$

Comme couple de démarrage, on a, pour $n_r = 0$:

$$M_a = \frac{230}{c_f} \cdot \frac{p}{n} \cdot \frac{1}{\lambda} E\, J \frac{Z'_f}{Z'_a}, \qquad (18)$$

c'est-à-dire que, abstraction faite du facteur $\frac{230}{c_f} = \frac{230}{1{,}4}$ à $\frac{230}{2{,}2}$, le couple est proportionnel au nombre de pôles $2p$ et aux volts-ampères appliqués $E_K J$, et inversement proportionnel à la fréquence, ainsi qu'au rapport de transformation du transformateur série.

La réaction des bobines court-circuitées produit, dans le moteur série à bobine transversale, un couple supplémen-

Digitized by Google

taire M_x, car K_x est augmenté dans le rapport $\frac{AW_f \pm AW_g}{AW_r}$; d'autre part, le couple normal est un peu réduit, c'est-à-dire $M = CSK_xZ'_a \cos x$, en appelant x l'angle entre K_x et J. Si K_y n'est pas nul, il existe encore un autre couple $CK_yJZ'_f \cos (90\text{-}x)$.

Si l'on veut tenir compte, dans l'expression du couple du moteur série à balais transversaux, de la réaction AW_e, il faut simplement introduire dans la formule 14 les valeurs et les angles correspondants pris sur les figures 94 et 95.

Le diagramme du moteur simple à répulsion, dans lequel le flux K_x est placé dans l'axe des balais du rotor, est tout à fait semblable à ceux des figures 94 et 95, mais on a $E_r = 0$, et E est produit dans l'enroulement du stator que l'on suppose décomposé en deux enroulements, l'un dans l'axe des balais et l'autre perpendiculaire à cet axe.

En ce qui concerne les pôles de commutation, il est bon de rappeler qu'un très grand nombre de brevets ont été pris pour les moteurs monophasés, parmi lesquels on peut indiquer les suivants :

Ateliers d'Oerlikon ; l'excitation des pôles auxiliaires est assurée par le secondaire d'un transformateur série, la phase du courant d'excitation pouvant être modifiée.

Siemens-Schuckert ; l'excitation des pôles auxiliaires est prise en dérivation aux bornes.

General Electric C° ; l'enroulement excitateur des pôles de commutation du moteur à répulsion est placé dans des encoches profondes du stator et est alimenté par les bornes du stator : un régulateur à force centrifuge intercale une résistance croissante dans ce circuit quand la vitesse augmente : le sens du courant d'excitation est inversé au delà du synchronisme.

General Electric C° ; l'excitation des pôles auxiliaires du moteur à répulsion est prise entre les balais du rotor court-circuités dans les moteurs normaux.

Digitized by Google

CHAPITRE III

DÉTAILS DE CONSTRUCTION

Généralités sur la construction des moteurs à collecteur : moteurs à courants alternatifs et continu. — Dimensions principales et détails de construction des différents moteurs actuellement en service dans des installations de traction électrique : modes d'emploi et méthodes de réglage. — Avant-projet d'établissement d'un moteur monophasé.

I. — GÉNÉRALITÉS SUR LA CONSTRUCTION DES MOTEURS A COLLECTEUR : MOTEURS FONCTIONNANT SUR COURANTS ALTERNATIFS OU SUR COURANT CONTINU.

Il y a lieu de remarquer que le moteur série simple n'a pu être établi jusqu'à présent que pour des différences de potentiel comprises entre 100 et 250 volts ; le moteur à répulsion et le moteur compensé avec transformateur série, au contraire, peuvent être construits pour des tensions atteignant 3.000 et 6.000 volts, même pour des applications de traction électrique. Il est vrai que l'on peut employer aussi un transformateur série avec des moteurs série.

Le bobinage d'un enroulement inducteur à haute tension de moteur monophasé peut offrir une beaucoup plus grande sécurité qu'un enroulement triphasé, parce qu'il n'existe aucun croisement dans les connexions extrêmes. Pour des applications de traction électrique, on peut amener aux voitures munies de moteurs à collecteur du courant sous 15.000 volts au moyen d'un seul fil aérien et des rails de roulement. Tandis que, aux bornes de l'inducteur d'un moteur série à courant continu, il n'existe aucune tension, il y a une différence de potentiel considérable aux bornes de l'inducteur à courant alternatif, ce qui est un inconvénient.

On peut aussi choisir deux tensions d'alimentation différentes, par exemple 3.000 volts sur la ligne interurbaine et 500 volts dans les villes ou dans les gares; on peut même alimenter les motrices avec du courant alternatif et avec du courant continu.

Digitized by Google

Les moteurs monophasés à collecteur peuvent, en effet, facilement fonctionner sur du courant continu ; les moteurs à répulsion exigent pour cela des modifications de connexions, mais les moteurs série peuvent fonctionner directement sur le courant continu, à condition d'être réunis par deux ou trois en série, s'ils sont établis pour 250 ou 200 volts et que la tension du courant continu soit de 500 ou 600 volts. Le moteur à répulsion est celui qui se prête le moins bien au fonctionnement sur courant continu.

L'avantage que présentent les moteurs monophasés de pouvoir fonctionner indifféremment sur deux sortes de courants, a été mis à profit dans un grand nombre d'installations de traction, où les lignes interurbaines ont pu être raccordées à des lignes de tramways déjà existantes et pénétrant dans le centre des villes.

La Compagnie Westinghouse a résolu le problème de la façon suivante. Le réglage des moteurs série, munis d'un enroulement compensateur, est effectué, dans la marche sur courant alternatif, par un autotransformateur et un régulateur de potentiel à partie mobile et, dans la marche sur courant continu, par des résistances simples. Le passage d'un mode de réglage à l'autre est effectué par un commutateur automatique.

La General Electric C° emploie, quand il s'agit d'alimentation mixte, le système de réglage série-parallèle des moteurs série avec adjonction de résistances non inductives (fig. 96 et 97) : pour la marche sur courant alternatif, elle emploie un transformateur refroidi par circulation d'air établi pour une tension de 3.000 à 5.000 volts sur la ligne aérienne.

Les Ateliers Siemens-Schuckert emploient, sur la ligne Vienne-Baden, un mode de réglage analogue à celui de la Compagnie Westinghouse.

Les moteurs compensés de l'A.E.G-Union (fig. 10) peuvent être alimentés directement par du courant continu ; il suffit pour cela de séparer le transformateur série et d'intercaler sur l'inducteur un enroulement compensateur décalé de 90° sur l'enroulement principal (fig. 39), afin de compenser la réaction d'induit et la tension de réactance. On peut, sans inconvénient,

Digitized by Google

laisser en place les balais court-circuités. La différence de potentiel aux bornes du moteur est plus élevée sur courant continu que sur courant alternatif.

La maison Ganz et Cie a établi, pour le Canada et pour le chemin de fer de Vienne à Presbourg, des moteurs à courants triphasés et à courant continu dont le rotor porte un collecteur et des bagues. Pour les deux sortes de courants, on effectue le démarrage au moyen de résistances liquides.

Courant continu.

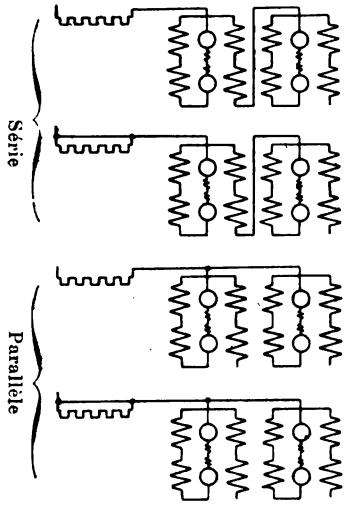


Fig. 96.

Courant alternatif.

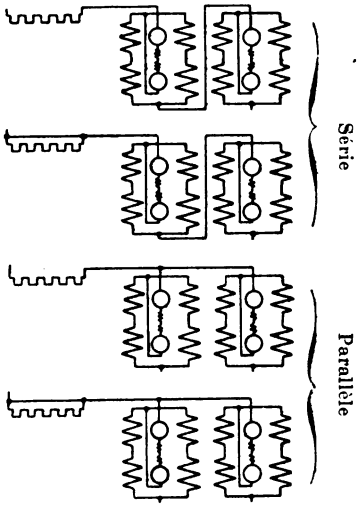


Fig. 97.

Les moteurs monophasés sont moins sensibles aux court-circuits et aux manœuvres brusques que les moteurs à courant continu : ils sont moins facilement avariés par une fausse manœuvre. Leur poids est, en général, de 10 à 30 % plus élevé que celui des moteurs à courant continu de même puissance et de même tension ; la saturation dans le fer est moins élevée. Pour les hautes tensions, l'augmentation de poids est encore plus considérable. En outre, l'équipement électrique d'une automotrice est un peu plus lourd dans le cas de moteurs monophasés que dans le cas de moteurs continus. Il y a lieu d'ajouter à ces indications générales que le moteur compensé exige deux fois plus de lignes de balais que le moteur à répulsion ou le

Digitized by Google

moteur série, les lignes de balais n'étant distantes que de 1/2 pas polaire. D'ailleurs on peut, dans le cas de moteurs tétrapolaires, réduire à 6 seulement (4 + 2) le nombre des lignes de balais. Le moteur à répulsion et le moteur série exigent moins de cuivre que le moteur à courant continu.

Les moteurs série ne peuvent être établis d'une façon rationnelle que pour des fréquences comprises entre 15 et 25 périodes, ce qui entraîne un accroissement de dépenses sensible pour les générateurs et les transformateurs électriques : une fréquence basse est d'ailleurs avantageuse pour la chute de tension. Le moteur à répulsion et le moteur compensé peuvent être construits sans difficulté par des fréquences de 40 à 60 périodes.

La puissance maxima des moteurs à collecteur actuellement en service atteint 200 chevaux : des moteurs de 300 chevaux sont en construction. Une locomotive de trains de marchandises de 1.500 chevaux (6 moteurs de 225 chevaux) a été établie par la Compagnie Westinghouse.

Il y a lieu de remarquer que les difficultés de commutation croissent avec la puissance du moteur.

Les générateurs et les transformateurs sont de 20 à 30 % plus lourds et plus coûteux pour du courant monophasé que pour des courants polyphasés : il est vrai qu'on peut employer des courants diphasés et répartir les moteurs ou les sections de la ligne sur les deux phases, ce qui est une complication de service.

La question de savoir s'il vaut mieux employer sur le stator des pôles saillants ou des enroulements répartis n'est pas facile à résoudre. Pour le moteur à répulsion ordinaire et le moteur compensé, l'enroulement réparti peut seul être employé par suite de la production nécessaire du champ transversal K_q ; au contraire les pôles saillants présentent pour le moteur série (et éventuellement pour le moteur à répulsion) un certain nombre d'avantages, car ce mode de construction est plus économique, donne lieu à un flux transversal K_q plus faible, et par suite à une plus faible composante déwattée de tension, c'est-à-dire à un meilleur facteur de puissance et à une meilleure commutation.

Digitized by Google

La tension de dispersion dans le cas d'enroulement réparti est, il est vrai, sensiblement plus faible que dans le cas des pôles saillants, mais le facteur d'utilisation c (1) de bobines concentriques est plus grand qu'avec un enroulement réparti, et cela dans le rapport de 2,2 à 2,1 ou à 1,4. La hauteur polaire radiale est beaucoup plus faible dans le moteur à courant monophasé que dans le moteur à courant continu ; le nombre d'ampère-tours par cm. de périphérie peut être plus considérable dans le moteur compensé que dans le moteur à courant continu.

II. — DÉTAILS DE CONSTRUCTION DE QUELQUES MOTEURS ACTUELLEMENT EN SERVICE ET MODES DE RÉGLAGE

Nous croyons intéressant de donner quelques détails de construction sur un certain nombre de moteurs employés

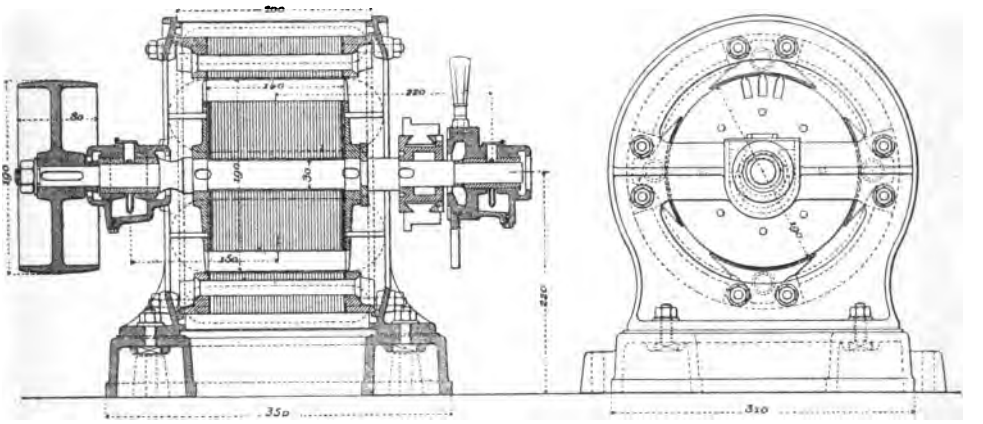


Fig. 98.

dans des installations fonctionnant depuis un temps plus ou moins long.

1°) Un ancien moteur série Ganz de un cheval, construit au Creusot (fig. 98), possède des pôles saillants et des barres en court-circuit pour compenser le champ transversal. Le couple de démarrage est triple du couple normal.

Les courbes de la figure 99 se rapportent à un moteur de 2 chevaux tétrapolaire à 110 volts de la maison Ganz et C^ie.

(1) $E_f = c.\ n.\ R_f.\ K_f.\ 10^{-8}$.

Digitized by Google

Les figures 100 à 102 représentent des tôles de moteurs monophasés de Ganz et C^ie établis en 1893 et possédant des enroulements amortisseurs sur l'inducteur et des résistances dans les connexions au collecteur.

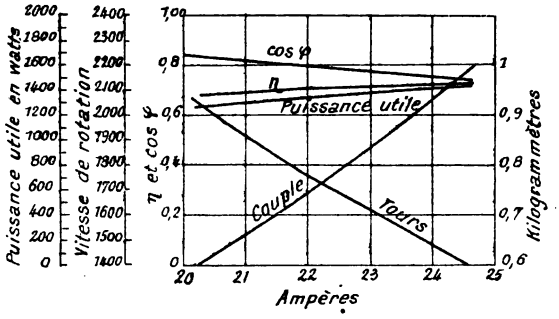


Fig. 99.

Les dents étaient fortement saturées : un commutateur permettait de modifier le nombre de tours d'enroulement de l'inducteur :

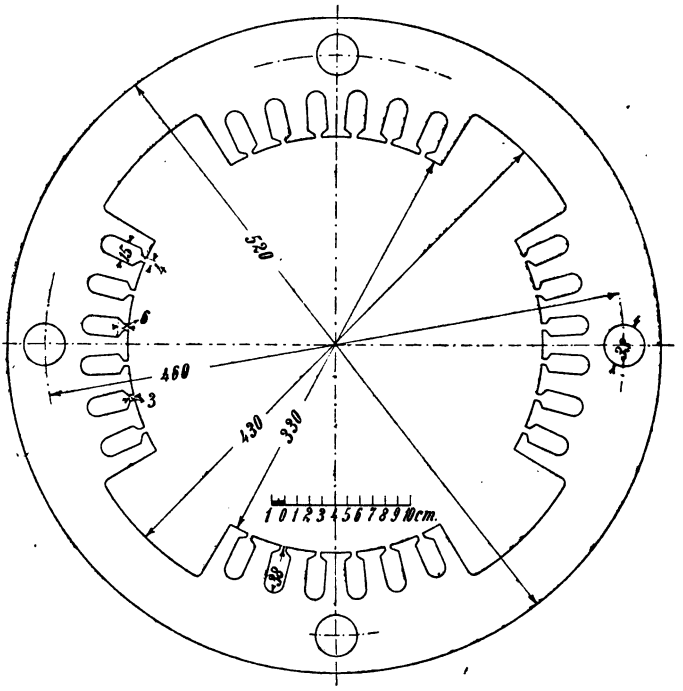


Fig. 100.

Blathy mentionne aussi, dans son brevet, l'emploi d'un trans-

Digitized by Google

formateur de réglage. La tension de l'induit était supérieure à celle de l'inducteur de 30 %.

2°) Le moteur série Lamme (Compagnie Westinghouse) est

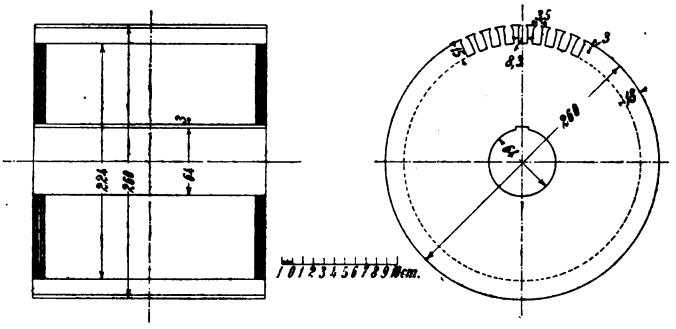


Fig. 101.

représenté par les figures 103 à 107 : il possède des connexions au collecteur 15 de résistance élevée, un enroulement imbriqué et un enroulement compensateur dans les pôles saillants. Dans

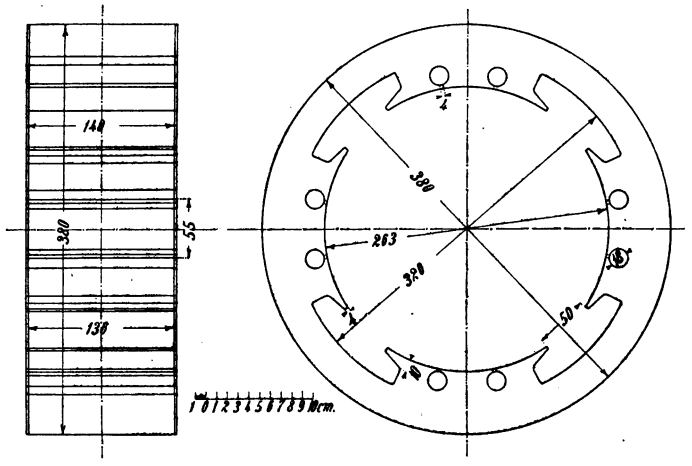


Fig. 102.

le brevet anglais relatif à ce moteur, il est mentionné que le rapport $\frac{\text{self-induction de l'inducteur}}{\text{force contre-électromotrice de l'induit}}$ doit avoir une valeur faible.

Digitized by Google

Le rendement maximum d'un moteur Lamme de 125 chevaux, 225 volts et 25 périodes est de 83,5 % environ, y compris les engrenages.

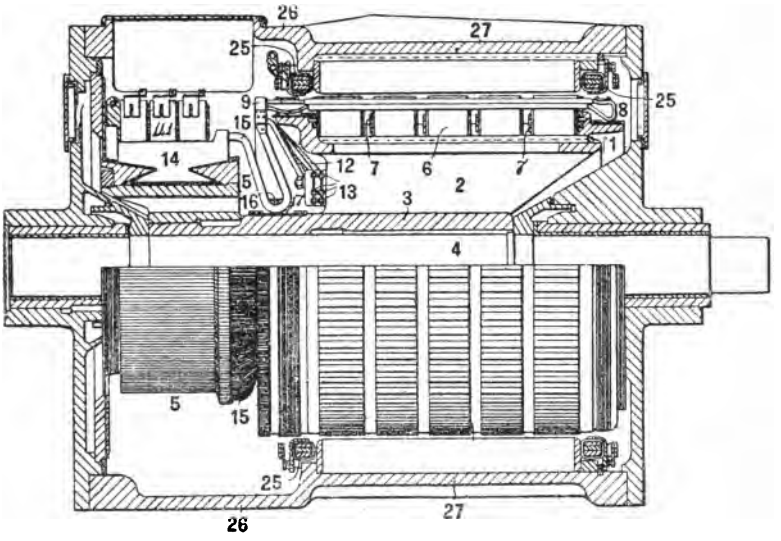


Fig. 103.

Le moteur Lamme a été employé par la Cie Westinghouse,

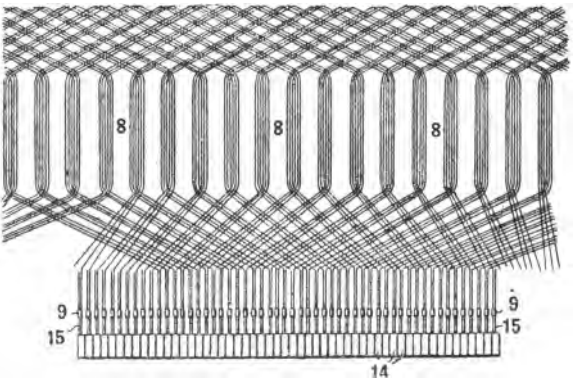


Fig. 104.

dans un grand nombre d'installations de traction. L'une des premières lignes uipéqées a été celle de Indianapolis à

Digitized by Google

Cincinnati. L'équipement des motrices comprend 4 moteurs série monophasés à collecteur de 75 chevaux ; un auto-transformateur principal bobiné pour une tension primaire de 550, de 1.650 ou de 3.300 volts et pour une tension secondaire d'environ 250 volts ; un inverseur ; un interrupteur ; un commutateur pour la marche sur courant continu ou la marche sur courant alternatif ; un système complet de commande à unités multiples ; des rhéostats connectés soit au circuit à courant alternatif, soit au circuit à courant continu ; un compresseur d'air entraîné directement par un moteur série à courant alternatif ou continu ; des réservoirs d'air ; deux caisses de 7 éléments d'accumulateurs ; un équipement de freins

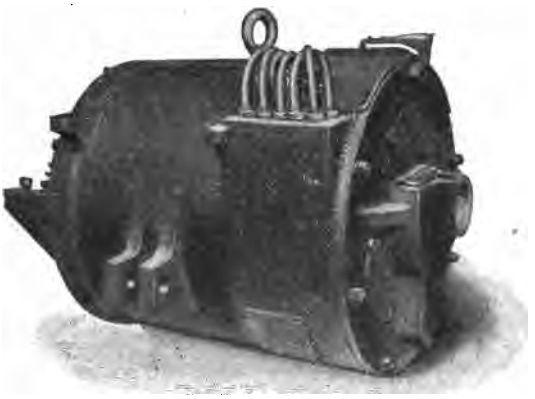


Fig. 105.

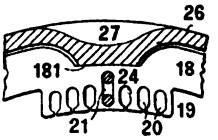


Fig. 106.

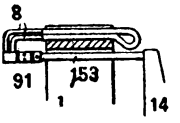


Fig. 107.

Westinghouse ; un trôlet pour la marche à basse tension et un trôlet pour la marche à haute tension.

Les moteurs de 75 chevaux sont établis pour assurer aux motrices une vitesse maxima de 72 kilomètres à l'heure et une vitesse moyenne de 50 kil. On construit actuellement des voitures spéciales avec 4 moteurs de 150 chevaux pour atteindre une vitesse moyenne de 50 à 60 kil. à l'heure. Le schéma des circuits est représenté par la figure 108 : la commande des moteurs est effectuée uniquement par des relais électro-pneumatiques actionnés par le manipulateur au moyen de onze conducteurs qui suivent tout le train. Les circuits de commande

Digitized by Google

sont absolument distincts des circuits principaux et sont

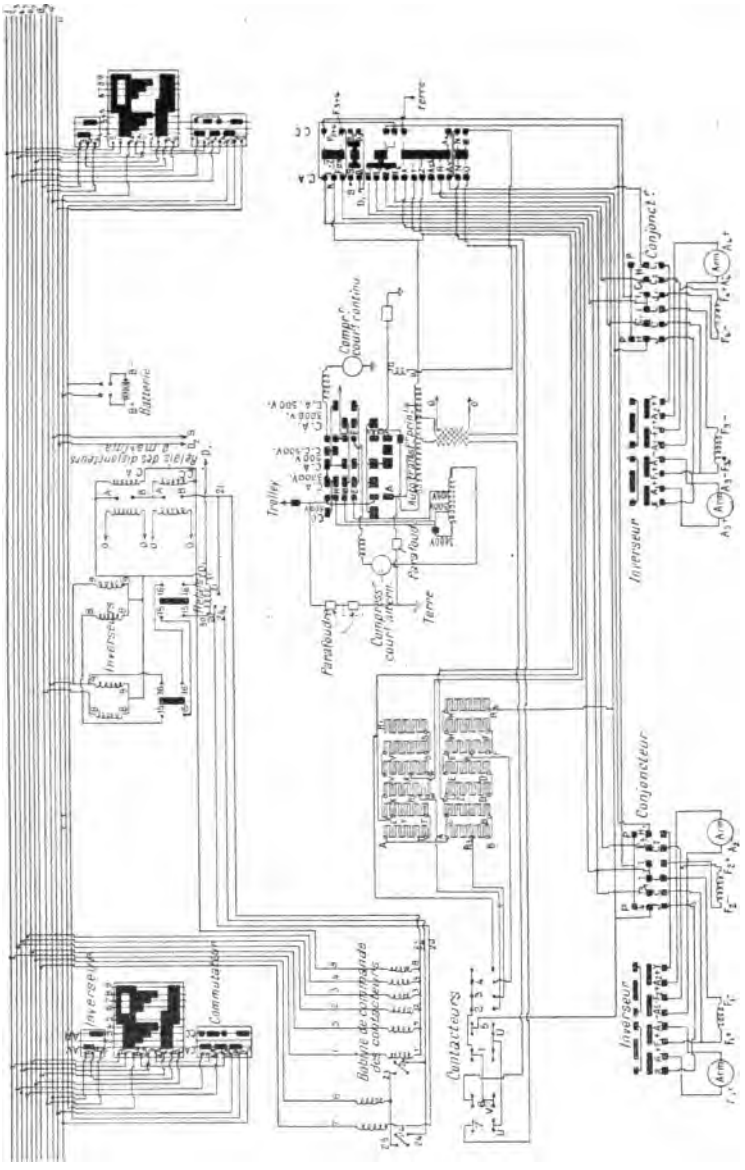


Fig. 108. — Schéma des connexions d'une automotrice Westinghouse à courant monophasé et courant continu.

alimentés par une batterie d'accumulateurs.

Digitized by Google

La fermeture des circuits a lieu dans l'ordre suivant :

1° Sur courant continu :

1re	position du manipulateur	:	circuits	8,7,1.
2e	—	—	: —	8,7,1,2.
3e	—	—	: —	8,7,1,3.
4e	—	—	: —	8,7,1,3,4.
5e	—	—	: —	8,7,5.

2° Sur courant monophasé :

1re	position du manipulateur	:	circuits	8,7,1.
2e	—	—	: —	8,7,1,4.
3e	—	—	: —	8,7,1,4,3.
4e	—	—	: —	8,7,1,4,3,2.
5e	—	—	: —	8,7,5.
				8,7,6,5.
6e	—	—	: —	8,6,5,4.
7e	—	—	: —	8,6,5,4,3.
8e	—	—	: —	8,6,5,4,3,2.
9e	—	—	: —	8,6,5,1.

Les circuits principaux reçoivent de l'énergie électrique de l'une quelconque des trois sources à 3.000 volts alternatifs, 500 volts alternatifs, ou 500 volts continus. Pour la marche sur courant continu, les 4 moteurs sont connectés en série et les démarrages sont faits uniquement sur résistances. Pour la marche à courant alternatif, un auto-transformateur, dont l'enroulement primaire porte deux entrées aux points correspondants à 3.000 et à 500 volts, produit deux tensions secondaires différentes pour l'alimentation des moteurs ; on emploie l'une ou l'autre de ces deux tensions suivant la vitesse à laquelle il est nécessaire de marcher. Les moteurs sont toujours connectés en parallèle, et le réglage pour chaque vitesse correspondant à l'un des deux voltages est obtenu au moyen de résistances.

3°) Le moteur Union de 100-125 chevaux est représenté par les figures 109 à 111. Il est tétrapolaire et est établi pour du courant de fréquence 25.

Les moteurs Union-A.-E.-G. (Winter-Eichberg) ont fait l'objet de plusieurs applications récentes (ligne de Niederschöneweide-Spindlersfeld ; chemin de fer de la vallée de la Stubaï ; chemin de fer du Borinage ; ligne de Hambourg-

Digitized by Google

Altona, et, prochainement, chemin de fer du London-Brighton).

La première ligne équipée est celle de Niederschöneweide-Spindlersfeld. Les moteurs sont tétrapolaires et ont un entre-fer de 3 mm. : leur puissance est de 100 chevaux et leur poids total, de 2.140 kgr. Un seul transformateur sert au réglage des

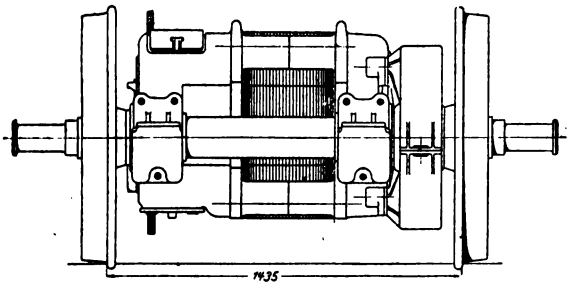


Fig. 109.

moteurs qui s'effectue entièrement sur le circuit à basse tension.

A l'arrêt, on ouvre simplement ce circuit sans débrancher le circuit à haute tension qui est parcouru par un courant extrê-

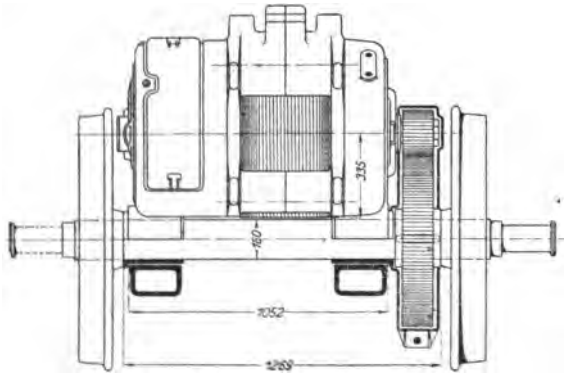


Fig. 110.

mement faible. Pour démarrer, on ferme le circuit sur la première touche du secondaire du transformateur, puis successivement sur les différentes touches jusqu'à la dernière.

La commande des appareils qui effectuent ces différentes manœuvres est assurée par le système à unités multiples de l'Union Elektricitäts Gesellschaft légèrement modifié pour son

Digitized by Google

application aux courants alternatifs. Ce système permet de commander, d'un seul point, les différentes motrices d'un train : toutes les connexions sont effectuées au moyen de contacteurs électromagnétiques actionnés par des circuits de commande aboutissant à un commutateur multiple, ou manipulateur. Le courant de commande qui circule dans ces circuits et excite les bobines des contacteurs est fourni par un petit transformateur.

L'inverseur est commandé par deux solénoïdes dont l'un ou l'autre est actionné par la manœuvre du cylindre d'inversion placé à côté du manipulateur. L'interrupteur à huile, placé sur le circuit à haute tension, est également commandé par le manipulateur au moyen d'un électro-aimant.

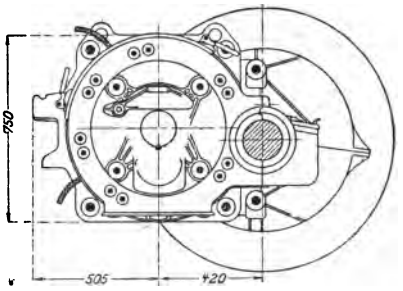


Fig. 111.

Le schéma des connexions est représenté par la figure 112. Pour plus de clarté, les circuits de commande *h*, *h'*, *r*, *s*, 6, 7, I, II, III, IV, V n'ont pas été figurés : il est facile de suppléer à leur absence en supposant reliés ensemble les points qui portent la même lettre ou le même chiffre. Le courant venant de l'archet passe par un parafoudre ordinaire et va, d'une part à un transformateur qui fournit le courant de commande des contacteurs ainsi que le courant nécessaire au compresseur et à l'éclairage, et d'autre part à un interrupteur à huile établi comme disjoncteur à maxima. Comme on le voit sur le schéma, la fermeture de cet interrupteur est assurée par une bobine excitée au moyen du manipulateur, et son ouverture est produite automatiquement, lorsque l'intensité du courant de traction dépasse une valeur déterminée, par l'action d'une bobine branchée sur le secondaire d'un petit transformateur série parcouru par le courant de travail. Après l'interrupteur, le courant passe par le primaire du transformateur de réglage, par les stators des deux moteurs reliés en parallèle, et va aux rails de roulements.

Digitized by Google

Parmi les différentes bornes du circuit secondaire du transformateur de réglage, l'une est reliée à l'inverseur, et chacune des autres à l'un des cinq contacteurs. Ces appareils aboutissent tous à une jonction commune qui va à l'inverseur. De celui-ci partent deux conducteurs, reliés aux circuits d'excitation connectés en série ou en parallèle des deux moteurs. Deux interrupteurs tripolaires permettent d'isoler l'un ou l'autre des moteurs en cas d'avarie.

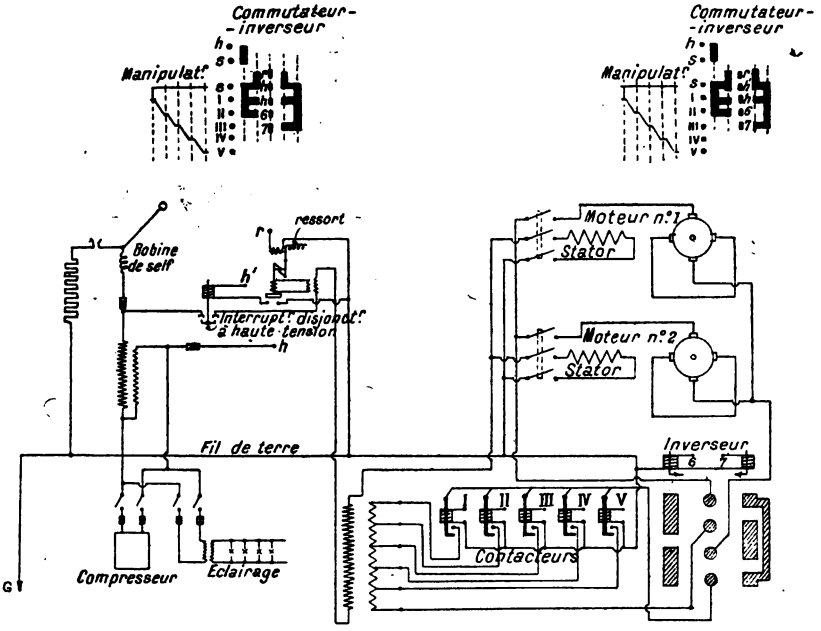


Fig. 112. — Schéma des connexions d'une automotrice de la ligne Spindlersfeld-Nieder Schöneweide.

Le manipulateur est constitué par un simple cylindre. Sa manette porte une poignée à bouton sur lequel le mécanicien doit avoir la main. L'abaissement du bouton ferme le contact *hs*, visible à la partie supérieure du schéma, et le circuit de commande est ouvert aussitôt que le mécanicien abandonne la poignée. Le manipulateur est accompagné d'un commutateur inverseur dont la rotation dans un sens ou dans l'autre fixe la position de l'inverseur sur la marche avant ou sur la marche arrière. Il existe entre ce commutateur et le manipulateur un

Digitized by Google

enclenchement tel qu'on ne puisse pas bouger le premier sans que le second soit au zéro et qu'on ne puisse pas manœuvrer le second sans que le premier soit dans l'une de ses deux positions extrêmes.

Pour mettre la voiture en marche, on amène le commutateur sur la position AV ou AR : les bobines *h'* et *r* reçoivent alors le courant de commande venant de *h* et l'interrupteur à haute tension est fermé. En même temps, l'une des bobines 6 ou 7 de l'inverseur reçoit le courant de *h* et l'appareil se place dans la position correspondante au sens de marche voulu. Ensuite, on déplace la manivelle du manipulateur en appuyant sur le bouton qui ferme le contact *s h*, et les différentes bobines des contacteurs I à V sont excitées tour à tour. Par suite de la fermeture successive de ces contacteurs, la différence de potentiel aux bornes des induits des moteurs va en croissant, et les différentes vitesses sont obtenues dans d'excellentes conditions sans aucune perte d'énergie.

Tous les appareils à haute tension sont placés dans une cabine incombustible fermée qui ne peut être ouverte qu'après abaissement de l'archet. Un seul câble à haute tension va de l'archet à cette cabine et de la cabine à l'une des bornes des moteurs dont l'autre borne est reliée directement à la terre. Le toit de la voiture est surmonté d'un filet protecteur, pour que la chute d'un conducteur aérien n'offre aucun danger. Tous les appareils accessibles sont à basse tension.

Le transformateur de réglage, le compresseur, le système de contacteurs, l'inverseur et les interrupteurs sont placés au-dessous du châssis.

Sur le tronçon d'essais où les motrices fonctionnent tantôt sur courant continu et tantôt sur courant alternatif, on a adjoint à un controller ordinaire un commutateur que le mécanicien place sur l'une ou l'autre position suivant la nature du courant. Le réglage des moteurs sur courant continu est effectué uniquement au moyen de résistances ; les deux moteurs sont invariablement reliés en série et sont soumis chacun à une différence de potentiel de 250 à 275 volts.

L'enroulement hexapolaire de chaque stator porte des bobines auxiliaires qui ne sont misès en circuit que pour la

Digitized by Google

marche sur courant continu. Le rôle de ces bobines est de compenser l'action des courants de court-circuit dans l'induit. Il eût été également possible, au lieu d'employer ces bobines auxiliaires, de rompre, pour la marche sur courant continu, les connexions de court-circuit entre balais, mais les constructeurs ont estimé que cela compliquerait le controller. Les bobines auxiliaires sont mises en circuit ou hors circuit par le jeu du commutateur.

Sur chaque rotor frottent six balais dont deux servent à l'excitation et dont quatre sont court-circuités deux à deux. Les deux rotors sont toujours en série, tandis que les stators peuvent être connectés en série ou en parallèle par la manœuvre du controller.

Sur la ligne du Borinage, chaque motrice porte deux moteurs de 40 chevaux : ces moteurs sont à six pôles et sont établis pour une différence de potentiel moyenne de 550 volts aux bornes et une fréquence de 40 périodes.

Comme on peut le voir en suivant le schéma de la figure 113, le réglage des moteurs est effectué par la méthode série-parallèle combinée avec réglage par auto-transformateur. Le démarrage n'est pas effectué sur résistances ; celles-ci ne servent que pour le passage de la marche en série à la marche en parallèle. Le stator et le rotor de chaque moteur peuvent être mis hors circuit au moyen d'un commutateur. L'auto-transformateur est refroidi par une circulation d'air et est placé sous la caisse de la voiture entre les deux essieux. Un certain nombre de prises de courant permettent de faire varier le voltage aux bornes des moteurs. Les controllers comprennent un gros et un petit cylindre et sont construits pour le freinage par court-circuit ou par renversement du courant. Le gros cylindre sert pour la marche et le freinage, et comprend deux positions pour la marche en série et trois positions pour la marche en parallèle. Le petit cylindre sert au renversement du sens de marche. Les controllers ne sont pas munis de soufflage magnétique, ce dispositif ayant été reconnu inutile.

4°) Le moteur Latour, tout à fait semblable au moteur Winter-Eichberg, est construit en France par la Compagnie

Digitized by Google

Thomson-Houston et a fait l'objet d'une application de trac-

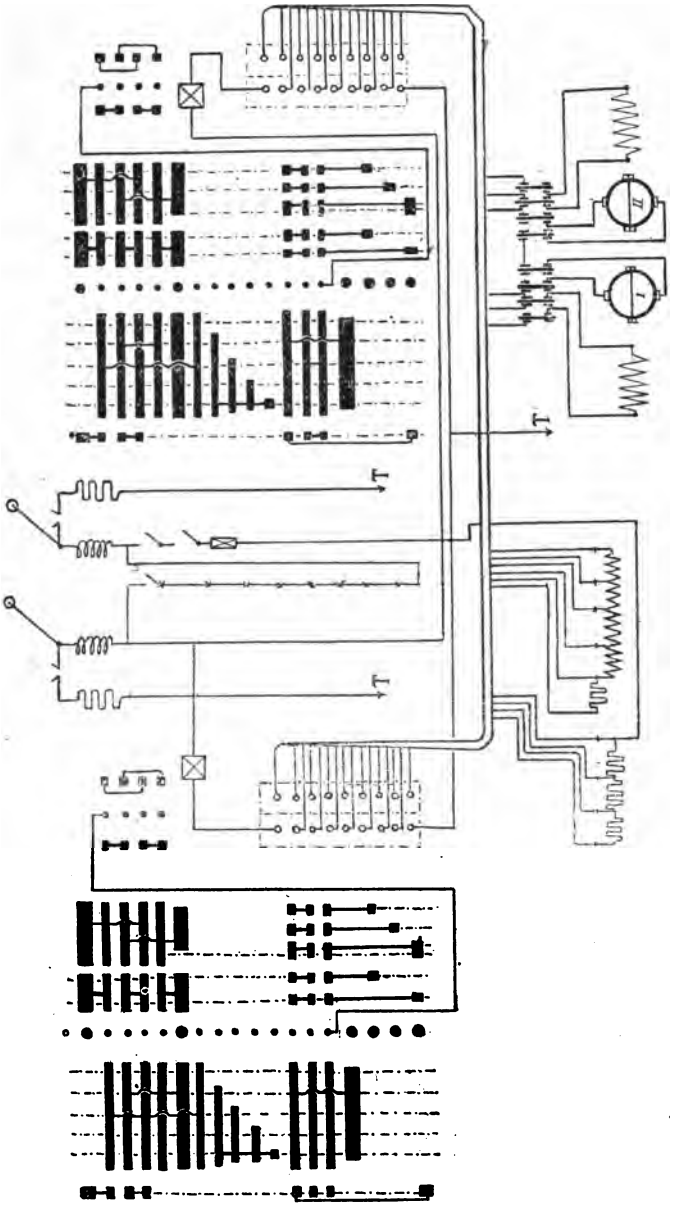


Fig. 113. — Schéma des connexions d'une automotrice du chemin de fer du Borinage.

tion électrique sur un tramway de Paris.

Digitized by Google

Le truck (fig. 114) porte deux moteurs qui attaquent les

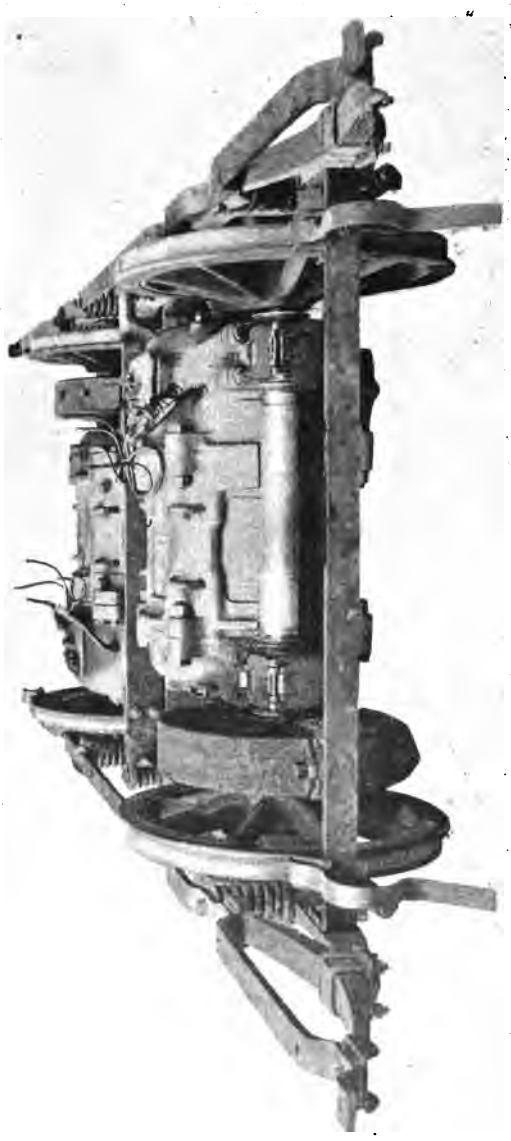


Fig. 114. — Truck de la voiture équipée par la Cie Thomson-Houston pour onctionner sur courant monophasé.

essieux par l'intermédiaire d'engrenages dont le rapport de démultiplication est 4,6. Chacun des moteurs, dont la figure 115

Digitized by Google

donne une vue, est tétrapolaire et a une puissance de 50 chevaux à 300 volts et 25 périodes, pour un échauffement maximum de 75° au bout d'une heure de fonctionnement ; son

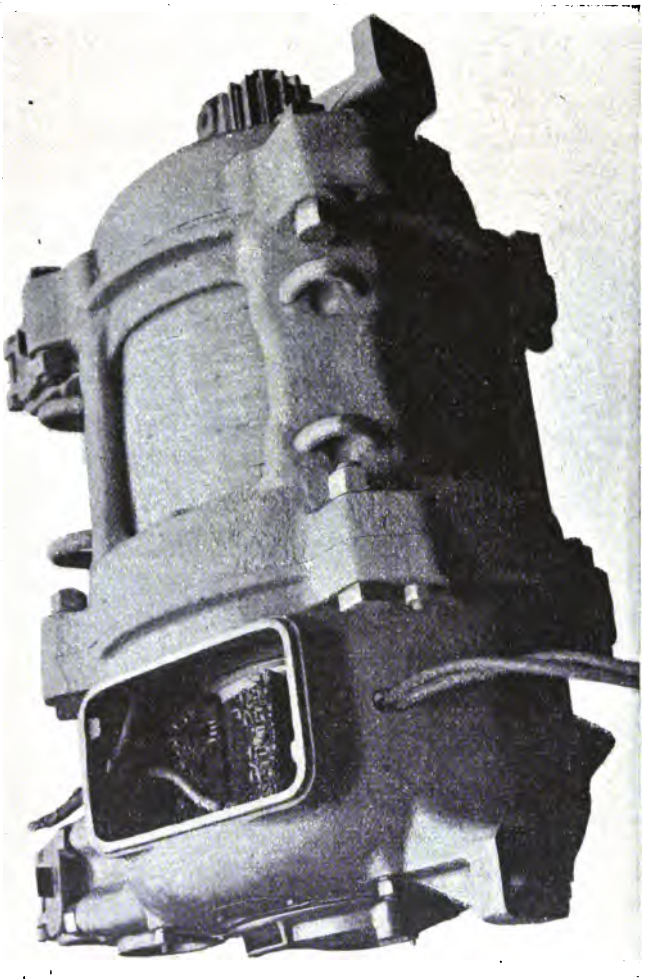


Fig. 115. — Moteur monophasé Thomson-Houston (Latour).

poids est de 1.350 kgs. Il est composé d'un stator à enroulements répartis, absolument analogue au stator d'un moteur d'induction monophasé (fig. 116). A l'intérieur de ce stator tourne, avec un entrefer de 2 mm., un rotor identiquement

Digitized by Google

semblable à un induit de moteur à courant continu (fig. 117), à cette différence près que, dans les moteurs expérimentés, on a établi très largement le collecteur pour obtenir d'une façon certaine une bonne commutation (1). La figure 118 montre la flasque du moteur portant les huit lignes de balais.

Les deux moteurs de la voiture sont reliés d'une façon permanente en parallèle et sont alimentés par un transformateur

Fig. 116. — Stator du moteur monophasé Thomson-Houston.

placé dans un bain d'huile. La cuve qui contient ce transformateur est fixée sous la voiture entre les deux essieux : l'appareil, prévu trop largement, pèse 1.100 kilogr. L'enroulement secondaire porte un certain nombre de prises de courant qui permettent de faire varier la différence de potentiel aux bornes des moteurs pour obtenir les différentes vitesses : le voltage secondaire correspondant à la grande vitesse est de 300 volts.

(1) La construction de ces moteurs a été étudiée par Gratzmüller.

Digitized by Google

Le schéma de la figure 119 montre l'équipement très sim-

Fig. 117. — Induit du moteur monophasé Thomson-Houston.

ple de la voiture avec deux postes de commande. Le courant

Digitized by Google

primaire, venant du trôlet, passe à travers deux interrupteurs placés à l'une et l'autre plate-forme, puis par le primaire du transformateur, et va aux rails de roulement. En dérivation sur le conducteur venant du trôlet est branché un parafoudre. Chaque moteur porte 4 bornes dont l'une est reliée à l'extrémité invariable de l'enroulement secondaire du transformateur et dont les 3 autres sont reliées aux trois bornes correspondantes des deux inverseurs.

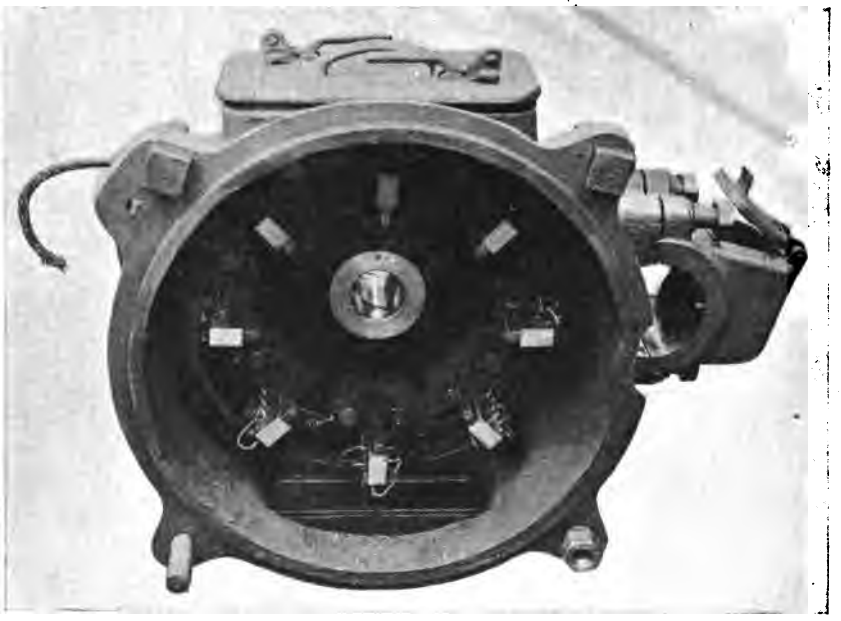


Fig. 118. — Vue des lignes de balais du moteur monophasé Thomson-Houston.

Le réglage de la vitesse est effectué au moyen de l'un des controllers placés aux deux postes de commande. Chaque controller est constitué (fig. 120) par un commutateur à 7 touches : ce commutateur consiste en un couteau mobile autour d'un axe horizontal et entraîné, par l'intermédiaire d'un ressort à boudin et de cames, par un bras mobile que fait tourner un pignon d'angle. Ce couteau pénètre entre des griffes de contact placées circulairement autour de l'axe de rotation et établit ainsi les contacts entre les différentes prises de courant du

Digitized by Google

secondaire et le conducteur aboutissant aux moteurs par l'in-

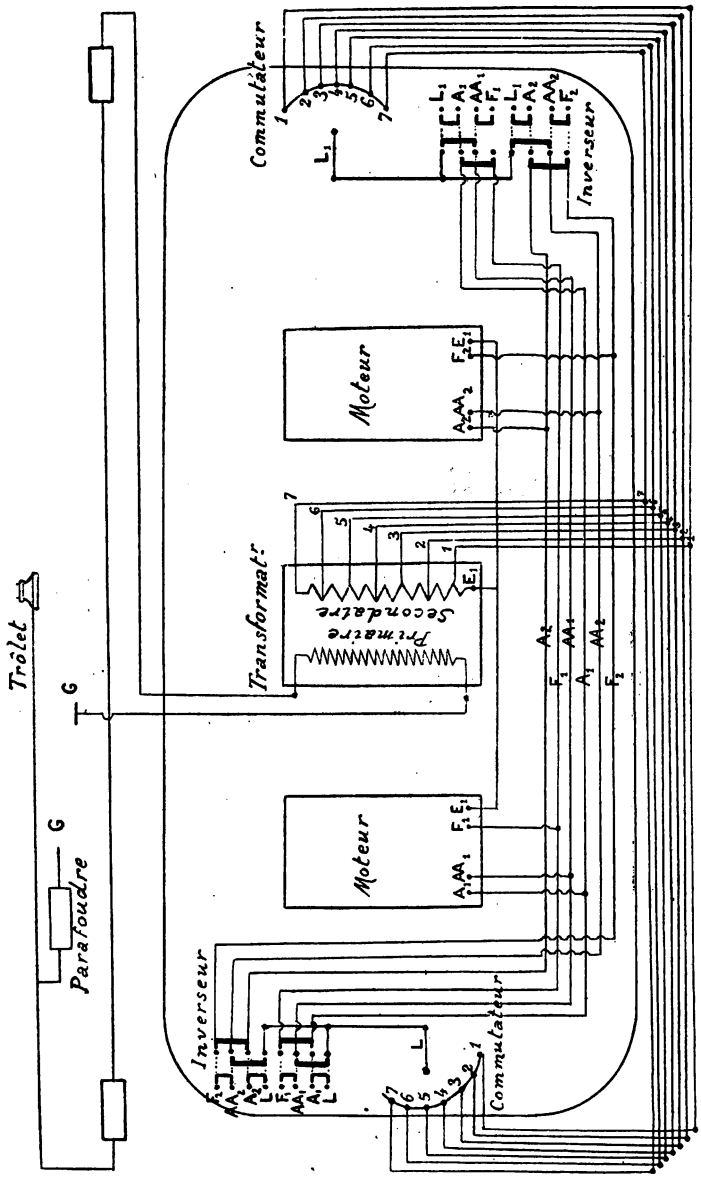


Fig. 119. — Schéma des connexions de l'automotrice Thomson-Houston équipée pour fonctionner sur courant monophasé.

termédiaire de l'inverseur. Grâce à la disposition adoptée et

Digitized by Google

au jeu des ressorts à boudin, les ruptures de contact sont excessivement brusques. L'inverseur est contenu dans le bâti

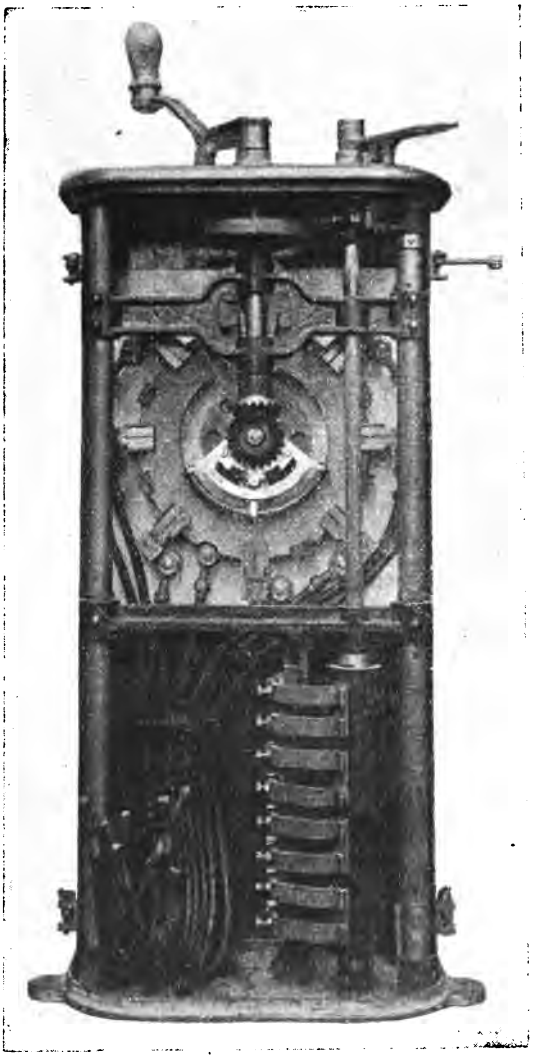


Fig. 120. — Controller de la voiture Thomson-Houston

du combinateur, et est visible à la partie inférieure de la figure 120.

Digitized by Google

5°) Le moteur des Ateliers d'Œrlikon, établi d'après un brevet de Behn Eschembourg, est représenté par la figure 121. Il a une puissance de 35 chevaux, tourne à une vitesse de rotation de 1.000 tours par minute et peut fonctionner comme moteur série à courant continu à 200 volts; comme moteur série monophasé à 200 volts, et pour des fréquences comprises entre 0 et 25 périodes; comme moteur simple à répulsion pour des fréquences de 40 à 50 périodes et une tension de 250 volts; comme moteur compensé avec balais en court-circuit pour 250 volts et 40 ou 50 périodes.

Fig. 12[illegible]

L'induit est établi comme les induits actuels à courant continu : les balais frottant sur le collecteur ont une épaisseur de 8 mm. La valeur simple de l'entrefer est de 1 mm. Le stator porte un enroulement à six pôles uniformément réparti placé dans deux portions décalées de 90° l'une sur l'autre. Quand le moteur fonctionne comme moteur série, l'une des portions sert d'enroulement excitateur et l'autre comme enroulement compensateur. Pour la marche en moteur à répulsion, on décale les balais d'un dixième du pas polaire par rapport à l'axe de l'enroulement inducteur.

Pour diminuer la production d'étincelles, on a saturé le fer. Les propriétés électriques de ce moteur sont résumées dans le tableau suivant :

VITESSE DE ROTATION	FRÉQUENCE	MODE DE FONCTIONNEMENT	RENDEMENT °/₀	COS φ °/₀
1000 tours	0	Courant continu	84	100
1000 —	22	Moteur série à ct mon.	81	96
880 —	44	Moteur à répulsion	83	96
880 —	44	Moteur compensé	81	100

Digitized by Google

Pour les vitesses de rotation comprises entre 800 et 1.000 tours, la commutation est excellente dans tous les cas. Pour les vitesses de rotation inférieures à 500 ou supérieures à 1.000, ce n'est plus le cas dans le fonctionnement comme moteur à répulsion ou comme moteur compensé.

Un nouveau moteur série de 200 chevaux, établi par les Ateliers d'Œrlikon, est particulièrement intéressant. Sa vitesse de rotation est de 650 tours, la tension d'alimentation est de 15.000 volts et la fréquence de 15 périodes. Les figures 122 et 123 donnent une vue de ce moteur. Il possède un système inducteur feuilleté à huit pôles saillants, entre lesquels sont placés de petits pôles auxiliaires excités en série par le cou-

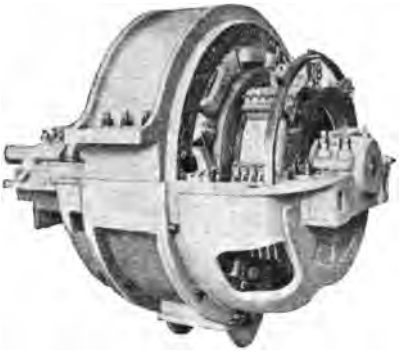


Fig. 122 *a*.

Fig. 122 *b*.

rant principal. La différence de potentiel aux bornes du moteur est de 260 volts. Avec des balais en charbon de 10 mm. d'épaisseur, la commutation est parfaite à toutes les vitesses comprises entre 0 et 1.000 tours par minute. A 650 tours, le facteur de puissance est $\cos \varphi = 94\,\%$; à 1.000 tours, $\cos \varphi = 97\,\%$. Le rendement à pleine charge atteint 92 %. Pour avoir une faible tension de court-circuit, on a saturé fortement le fer. L'induit porte un enroulement imbriqué avec connexions d'égalisation.

Des moteurs de ce type ont été placés sur une locomotive de 43 tonnes et les essais sur la ligne Seebach-Wettingen ont été très satisfaisants.

Le réglage de la vitesse est effectué au moyen de deux systèmes différents ; d'une part avec un transformateur dont

Digitized by Google

le secondaire porte 20 prises de courant ; d'autre part au moyen d'un régulateur d'induction formant survolteur-dévolteur et permettant de faire varier de ± 150 volts par rapport à la tension normale la différence de potentiel aux bornes des moteurs, reliés d'une façon permanente en série sous 600 volts.

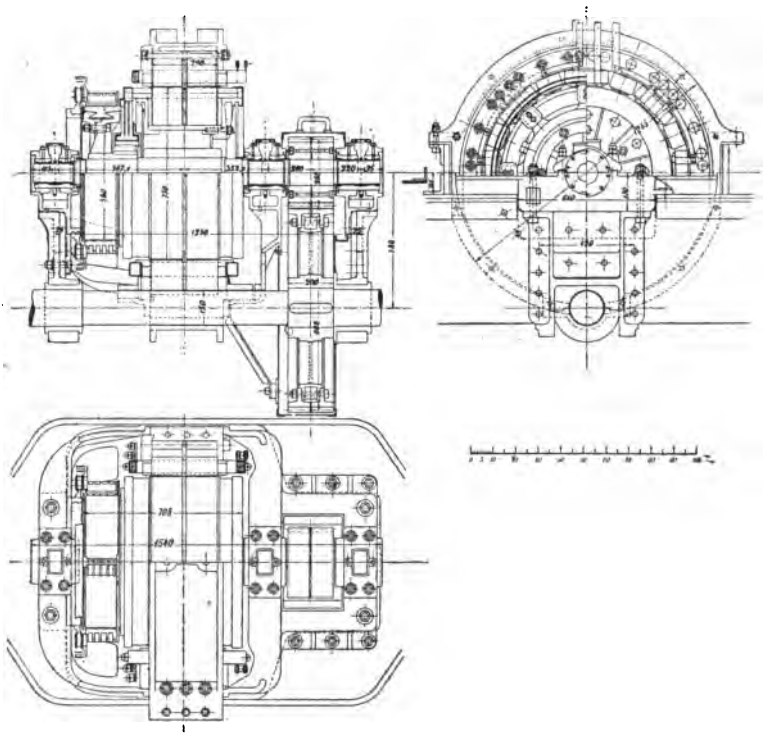


Fig. 123.

6°) La figure 124 représente un moteur monophasé continu de la General Electric C° pour 50 chevaux et 200 volts. Les connexions sont représentées par la figure 37 : l'enroulement compensateur neutralise, aussi bien sur courant continu que sur courant monophasé, la réaction d'induit et, en partie, les forces électromotrices en jeu dans les bobines court-circuitées par les balais. Le transformateur de démarrage et de réglage de 80 KVA est représenté sur la figure 125 ; il est refroidi par circulation d'air.

Digitized by Google

La première application des moteurs de la General Electric C° à la traction a été faite sur la ligne de Schenectady à Ballston.

Fig. 124.

Les voitures motrices sont alimentées par du courant monophasé à 2.000 volts, 25 périodes à l'extérieur des villes, et par du courant continu à 600 volts à l'intérieur de Schenectady.

Les voitures automotrices pèsent 30 tonnes 1/2 et sont construites pour une vitesse d'environ 70 kilomètres à l'heure

Fig. 125.

en palier : elles peuvent contenir 44 voyageurs. La caisse est supportée par deux trucks Brill à deux essieux ayant un empattement de deux mètres et portant deux moteurs série compensés de 50 chevaux. Chaque moteur comprend un inducteur en tôles en forme d'anneau, construit comme le stator d'un

Digitized by Google

moteur polyphasé ordinaire ; ce stator porte deux groupes d'enroulements distincts, l'un des groupes servant à l'excitation et l'autre groupe à la compensation. Dans le stator tourne un induit à collecteur semblable, comme construction mécanique, à un induit de traction ordinaire à courant continu. Sur le collecteur frottent des lignes de balais, en nombre égal au nombre

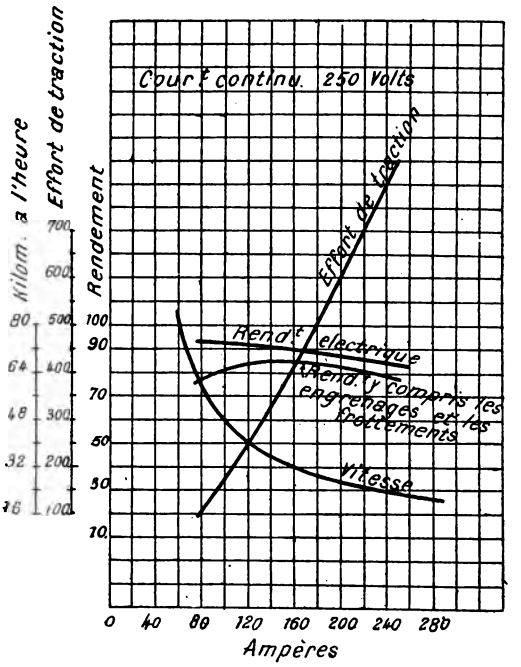


Fig. 126. — Courbes caractéristiques d'un moteur série compensé, de la General Electric C°, alimenté par du courant continu.

total de pôles, calées sur les lignes neutres. L'entrefer a une valeur à peu près double de celle des moteurs d'induction de même puissance. Les moteurs sont bobinés pour 200 volts et sont connectés d'une façon permanente deux par deux en série : ils sont alimentés par le secondaire d'un transformateur de 80 kilowatts à refroidissement d'air qui abaisse la tension à 400 volts. La réaction d'induit étant compensée, le facteur de puissance que présente ce type de moteurs est élevé.

Les courbes des fig. 126 et 127 indiquent les caractéristiques

Digitized by Google

pour le fonctionnement à courant continu et à courant alternatif. La vitesse varie avec la charge, ce qui est avantageux pour des moteurs de traction, particulièrement sur des lignes accidentées. La commutation a lieu sans étincelles pour la marche à courant alternatif, comme pour la marche à courant continu, grâce aux bonnes proportions données aux différents organes : aucun artifice accessoire, tel que l'introduction de

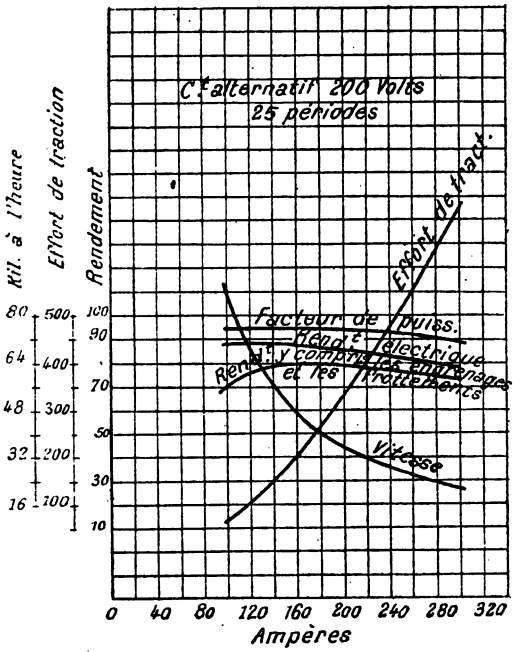


Fig. 127. — Courbes caractéristiques d'un moteur série compensé de la General Electric C°, alimenté par du courant alternatif.

résistances dans les connexions au collecteur, n'a été employé.

Le réglage des moteurs est obtenu au moyen d'un controller ordinaire série-parallèle auquel on a adjoint un commutateur pour modifier les connexions des inducteurs, fermer ou rompre le circuit du transformateur abaisseur de tension, etc., quand on passe de la marche sur courant continu à la marche sur courant alternatif; l'installation est complétée par deux interrupteurs à l'huile manœuvrés à la main et placés, l'un sur le circuit à courant alternatif et l'autre sur le circuit à courant continu. Ces

Digitized by Google

interrupteurs sont enclenchés de telle façon qu'un seul des deux peut être fermé. Le courant est recueilli par deux trôlets,

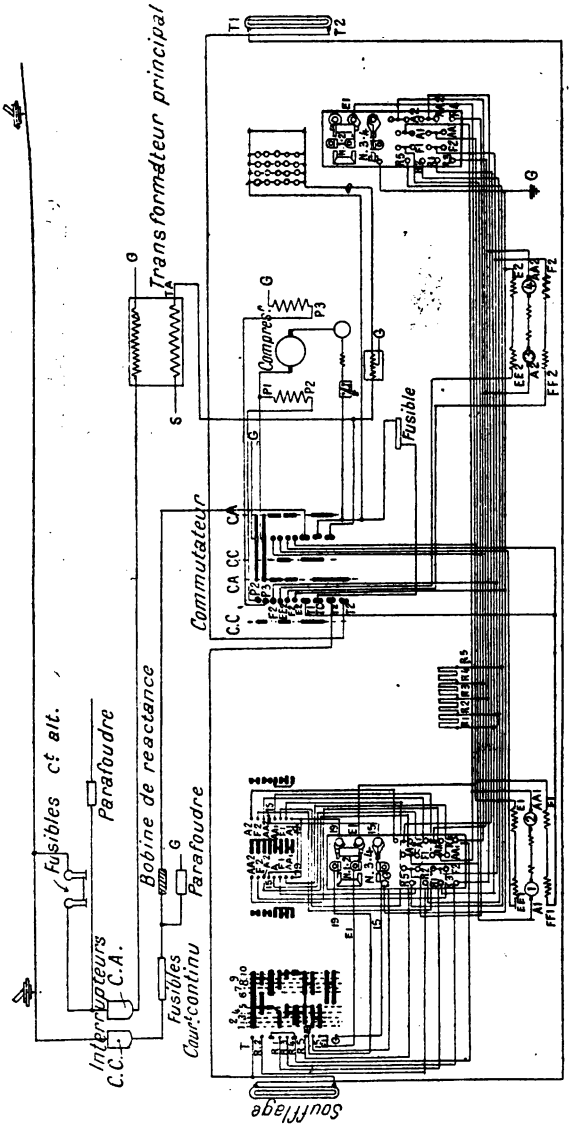


Fig. 128. — Schéma des connexions d'une automotrice de la General Electric Co (ligne de Schenectady à Ballston).

servant l'un pour le courant alternatif, l'autre pour le courant continu. Les moteurs sont reliés invariablement en série par

Digitized by Google

groupes de deux : sur courant continu, les inducteurs d'un groupe sont toujours en série ; sur courant alternatif, ils sont toujours en parallèle. Les deux groupes ainsi formés sont reliés en série ou en parallèle avec ou sans intercalation de résistances au moyen du controller que manœuvre directement le mécanicien. Il est à noter que l'on obtient la même vitesse en alimentant les moteurs sous 200 volts en alternatif ou sous 300 volts en continu. Le schéma des connexions est indiqué par la figure 128.

Le système de réglage série-parallèle avec résistances a été adopté pour plus de simplicité à cause de l'obligation de marcher tantôt sur courant continu, tantôt sur courant alternatif. Dans ce dernier cas, il vaudrait évidemment mieux obtenir les différentes vitesses en modifiant, au moyen du transformateur, la différence de potentiel aux bornes des moteurs : on améliorerait ainsi d'environ 3 % le rendement du système.

Dans le cas où il n'est question que de courant alternatif, il n'y a évidemment pas à hésiter et l'on doit choisir la méthode de réglage par variation de la différence de potentiel, mais, dans le cas du chemin de fer de Ballston à Schenectady, l'adoption de cette méthode conduirait à l'emploi de deux systèmes de circuits et d'appareils de commande absolument distincts qui exigeraient beaucoup de place et causeraient une sensible augmentation de poids.

Il est intéressant de comparer les courbes de vitesse, d'intensité et de tension en fonction du temps, relevées pour la marche sur le courant alternatif et sur courant continu. Ces courbes sont indiquées par les figures 129 et 130 et les principaux résultats sont résumés dans le tableau ci-dessous :

	COURANT CONTINU	COURANT ALTERNATIF
Longueur parcourue	2 km. 56	2 km. 56
Poids de la voiture	31 tonnes 1/2	31 tonnes 1/2
Durée	180 secondes	180 secondes
Voltage moyen	609	425
Intensité moyenne	229	346
Kilovolts-ampères à pleine vitesse en palier	98	110
Vitesse moyenne (kil. à l'heure).	51 km. 2	51 km. 2

Digitized by Google

La ligne de Bloomington, Pontiac et Joliet est aussi exploitée avec des moteurs de la General Electric C°.

Les automotrices ont environ 12 m. 50 de longueur ; elles sont supportées par deux trucks Brill à deux essieux de 2 mètres d'empattement. Chacun des quatre essieux est entraîné par un moteur-série compensé de 75 chevaux. Ces moteurs, dont le poids est d'environ 2.400 k., sont, au point de vue électrique, du même type que les moteurs employés sur la ligne de Schenectady à Ballston. Ils sont bobinés pour 200 volts et sont groupés par quatre en série d'une façon permanente. Au point de vue de la construction, ces moteurs diffèrent un peu des précédents en ce que les tôles et les enroulements du stator sont indépendants de la carcasse ; celle-ci, constituée par plusieurs pièces assemblées par des boulons, est facilement démontable, ce qui permet d'effectuer aisément et simplement les réparations en

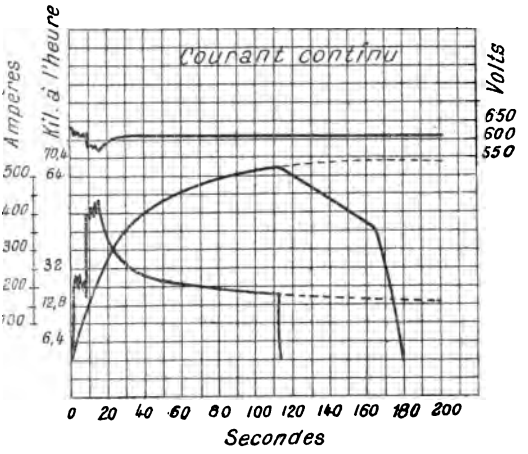


Fig. 129. — Courbes relatives à une automotrice de la ligne Schenectady-Ballston alimentée par du courant continu.

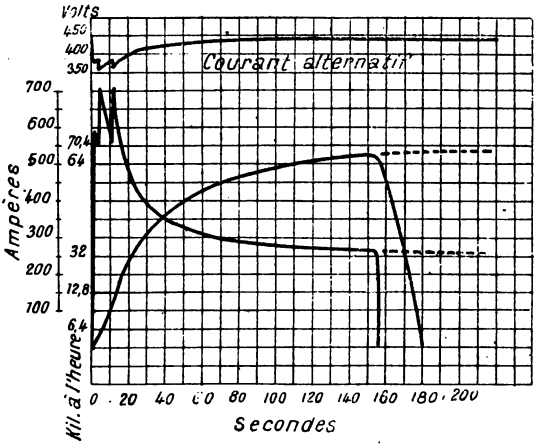


Fig. 130. — Courbes relatives à une automotrice de la ligne Schenectady-Ballston alimentée par du courant alternatif.

Digitized by Google

cas d'avarie. Les moteurs sont suspendus par le nez et le rapport de démultiplication des engrenages est 4,3.

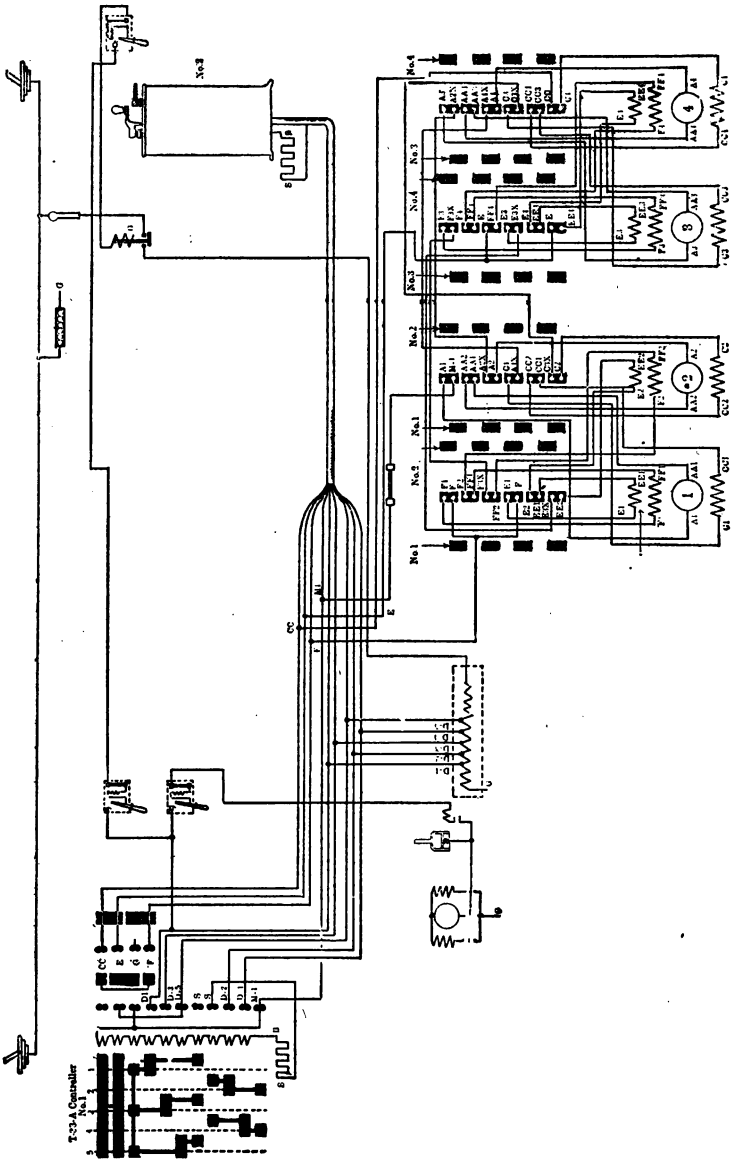


Fig. 131. — Schéma des connexions d'une automotrice de la ligne de Bloomington, Pontiac et Joliet.

Le réglage de la vitesse est effectué au moyen d'un trans-

Digitized by Google

formateur de 110 kilowatts placé dans un bain d'huile ; le récipient, qui contient le transformateur, est muni d'ailettes de refroidissement et est fixé sous le châssis. Les enroulements secondaires portent un certain nombre de prises de courant, qui permettent d'obtenir un voltage de 400, 500, 600, 700 ou 800 volts. A ces cinq bornes correspondent cinq crans du controller ; pour que les doigts de celui-ci ne mettent pas en court-circuit les différentes sections du secondaire, on a prévu une résistance qui est intercalée au passage d'une touche à la suivante. Chaque doigt de controller est muni d'une bobine de soufflage magnétique ; les différentes bobines sont connectées en série entre elles et avec la résistance intercalée ; elles ne sont parcourues par le courant qu'au moment du passage d'une touche à une autre ou de la dernière touche au cran zéro. Chaque paire de moteurs est commandée par un inverseur cylindrique. Le schéma des connexions est indiqué sur la figure 131. Avec cette méthode de réglage, le rendement des moteurs est pratiquement le même à toutes les vitesses, et c'est là un des avantages considérables que l'emploi du courant monophasé présente sur l'emploi du courant continu.

7°) Les moteurs monophasés à collecteur ont été appliqués récemment, non seulement à la traction électrique, mais aux appareils de levage dans lesquels il est avantageux d'avoir des moteurs dont la caractéristique se rapproche de ceux des moteurs série à courant continu.

III. — AVANT-PROJET DE MOTEUR MONOPHASÉ

Pour établir l'avant-projet d'un moteur monophasé, on s'appuie sur les données suivantes :

Le facteur $$C = \frac{P}{d^2 l u}$$

a une valeur plus faible (de 10 à 20 %) que dans les moteurs à courant continu, et diffère peu du facteur correspondant des moteurs triphasés. Dans l'expression de C, P désigne la puissance en chevaux, d le diamètre de l'induit, l la longueur axiale du fer actif en mètres, u le nombre de tours par minute.

Digitized by Google

Le facteur C est aussi proportionnel à

$$\frac{p}{\tau} \mathrm{AC}.\mathrm{B}_l.\cos\varphi$$

expression dans laquelle $\frac{p}{\tau}$ représente le rapport de l'arc polaire au pas polaire, AC le nombre d'ampère-conducteurs par cm. de périphérie et B_l l'induction dans l'air. Pour des moteurs d'environ 20 chevaux, la valeur de C est comprise entre 0,8 et 1,5; pour de faibles puissances, cette valeur est comprise entre 0,3 et 0,8. Pour un fonctionnement intermittent, on peut prendre pour C une valeur comprise entre 1,5 et 3.

Le nombre de pôles $2p$ est donné, pour le moteur à répulsion, par la formule

$$2p = 120.\frac{n}{u}$$

n désignant la fréquence et u la vitesse de rotation. Pour le moteur série, la valeur de $2p$ est 1,5 ou 2 fois plus considérable que la valeur indiquée par la formule.

Si le diamètre n'est pas fixé, par exemple, par la valeur de la vitesse périphérique

$$v = \frac{\pi d}{60} u,$$

qui doit être inférieure à 20 mètres par seconde, on choisit un diamètre tel que l'on ait

$$0{,}7l \leq \frac{\pi d}{2p} \leq l$$

ce qui permet, connaissant en outre la valeur de C, de déterminer les valeurs de d et l.

Le nombre d'ampère-conducteurs AC par cm. de périphérie de l'induit est plus petit, dans le moteur série et le moteur à répulsion, que dans le moteur à courant continu : dans le moteur compensé, il peut être plus grand. Il est compris entre 100 et 250 suivant la puissance du moteur; dans le moteur compensé il est même supérieur à ce chiffre.

De l'égalité

$$\mathrm{AC} = \frac{J_a Z_a}{2a},$$

Digitized by Google

et de la valeur du courant

$$J_a = \frac{736.P}{E_K.\eta.\cos\varphi},$$

on déduit le nombre de conducteurs induits Z_a.

Le nombre $2a$ des branches de l'induit est égal au nombre de pôles dans l'enroulement imbriqué ordinaire. La valeur du rapport $\frac{J_a}{2a}$ ne doit pas dépasser 100 ampères.

Les valeurs de η doivent être évaluées à 0,80 ou 0,85 pour des moteurs de puissance moyenne : les valeurs à prendre pour cos φ sont comprises entre 0,90 et 0,95.

La différence de potentiel E_k aux bornes d'un moteur série doit être inférieure à 300 volts. Si l'on suppose qu'à pleine vitesse la tension induite E_a est égale à 0,9 E_K, on tire la valeur du flux K de l'équation

$$E_a = \frac{1}{\sqrt{2}} n \frac{Z_a}{a} K\, 10^{-8}.$$

Pour le moteur série, il faut remplacer n par n_r, $2n$ ou $3n$ dans cette formule.

Du flux K et de l'induction B, on déduit les sections du fer. L'induction B ne doit pas dépasser 10.000 dans le stator pour une fréquence de 25 périodes par seconde. Elle peut dépasser cette valeur dans le rotor du moteur à répulsion et du moteur compensé ; au contraire elle doit lui être inférieure dans le rotor du moteur série.

Du courant par branche ou par conducteur et de la densité de courant qui, en service permanent, ne doit pas dépasser 2 à 3 ampères par millimètre carré, mais peut atteindre 3 à 5 ampères pour un service intermittent, on déduit la section des conducteurs sur le stator et le rotor et, en comptant sur une épaisseur d'isolant déterminée (0,75 mm. de chaque côté pour 500 volts ; 4 mm. de mica pour 6.000 volts), on peut déterminer la forme des encoches qui, dans les moteurs non compensés, doivent être aussi peu profondes que possible.

L'induction dans les dents ne doit pas dépasser 12.000 à 14.000 pour une fréquence de 25 périodes.

La valeur de l'entrefer δ peut être un peu plus grande que dans les moteurs triphasés de même diamètre, mais doit être

Digitized by Google

plus petite que dans les moteurs à courant continu. On a la formule :

$$\delta \geqq \frac{d}{200 + 2d}.$$

Dans les moteurs de traction, δ doit avoir une valeur plus grande que dans les moteurs fixes.

$$\delta \geqq \frac{d}{150 + d}.$$

La tension de réactance e_R et la tension induite e_i doivent avoir des valeurs aussi faibles que possible ; pour cela on adopte un nombre élevé de lames au collecteur et l'on emploie une seule bobine par lame. L'épaisseur de celle-ci ne doit, d'ailleurs, pas être inférieure à 3 ou 4 mm.

La tension de réactance doit être approximativement donnée par la formule suivante :

$$e_R = f \cdot \frac{v_k}{s_b} \left(\frac{Z_a}{2k}\right)^2 \left[c_1 l_e + c_2 l_s\right] \frac{J_a}{2_a} 10^{-8} \text{ volts}$$

dans laquelle

v_k désigne la vitesse du collecteur
s_b désigne l'épaisseur des balais
k le nombre de lames au collecteur
l_e la longueur de fer actif en cm.
l_s la longueur des bouts d'enroulement par conducteur
$c_1 = 15$ approximativement
$c_2 = 3$ approximativement.
f = nombre de bobines court-circuitées ensemble.

La valeur de e_R devrait être inférieure à 1 ou 2 volts. Outre la tension de réactance, il faut calculer toutes les autres f. é. m. dans les bobines mises en court-circuit par les balais, puisqu'il faut les additionner ; leur somme doit être inférieure à 6-10 volts pour toutes les charges, surtout pour le démarrage et la vitesse normale.

La densité de courant sur les enroulements principal et auxiliaire du stator peut atteindre, avec un refroidissement approprié, 2 à 3 ampères par mm². Les balais en charbon ne doivent pas couvrir plus de 2 à 3 lames ; la densité de courant dans ces balais doit être comprise entre 4 et 8 ampères. La vitesse péri-

Digitized by Google

phérique du collecteur devrait être, autant que possible, inférieure à 15 mètres par seconde.

Exemples :

Pour les avant-projets de moteurs monophasés, on peut se rapporter aux figures suivantes :

Figure 11 : moteur de 3 chevaux, 1.500 tours.

Figure 18 : moteur de 10 chevaux, 750 tours, à 6 et 8 pôles ; 100 volts ; diamètre extérieur des tôles du stator, 582 mm. ; diamètre intérieur de ces tôles, 421 mm. ; entrefer, 0,75 mm. ; longueur axiale de fer, 125 mm. ; nombre d'encoches sur le stator, 72 ; nombre d'encoches sur le rotor, 130 ; diamètre du collecteur, 167 mm. ; nombre de lames, 65 ; rotor à enroulement ondulé à connexions longues et courtes.

Figure 23 : moteur de 5 chevaux, 1.000 tours.

Figure 98 : moteur de 1 cheval, 1.800 tours, 40 périodes, 4 pôles.

Figure 100 : moteur de 5 chevaux, 40 périodes.

Figure 101 : moteur de 2 chevaux, 40 périodes.

La valeur du rapport $\frac{\text{ampère-tours induits}}{\text{ampère-tours inducteurs par pôle}}$ doit être plus grande que l'unité et doit, dans la plupart des cas, être comprise entre 2 et 5. Dans le cas du moteur à répulsion, il ne faut compter comme ampère-tours induits que les ampère-tours transversaux. On déduit de la valeur du rapport des ampère-tours la valeur de δ, puisque l'on connaît les ampère-tours induits et inducteurs donnés par les équations ci-dessous :

$$\textit{induit} \ldots\ldots\ldots \mathrm{AW}_a = \frac{\mathrm{J}_a \mathrm{Z}_a}{8_a p}$$

$$\textit{inducteur} \ldots\ldots \mathrm{AW}_f = \frac{c' \mathrm{J}_f \mathrm{Z}_f}{4\,p} = 1{,}3.0{,}8.\mathrm{B}_l.\delta$$

Dans ces équations,

J_f désigne le courant dans le stator,

Z_f le nombre de conducteurs dans le stator,

B_l l'induction moyenne dans l'entrefer

c' un coefficient dont la valeur est comprise entre 1 (pôles saillants) et 0,7 (enroulement réparti dans un grand nombre d'encoches),

1,3 un facteur tenant compte de la réluctance magnétique.

Digitized by Google

On peut prendre en moyenne pour B_l une valeur comprise entre 2.000 et 5.000.

Avec l'égalité $AW_f = {}^1/_2$ à ${}^1/_3 AW_2$ et la valeur du courant de pleine charge J_f dans le stator, on peut trouver le nombre de tours nécessaires sur le stator.

$$Z_f = \frac{AW_f . 4p.}{c' J_f}$$

Ces tours sont placés, soit dans des encoches réparties, soit sur des pôles saillants dont le nombre est sensiblement plus faible que dans le cas du courant continu. L'enroulement monophasé réparti ne couvre que les deux tiers de la périphérie, un tiers des encoches restant vide. Il faut choisir un nombre élevé d'encoches par pôle (de 6 à 16).

Le nombre d'ampère-tours des enroulements compensateurs auxiliaires doit être compris entre AW_a et $\frac{P}{\tau} AW_a$. Le nombre d'ampère-tours des pôles auxiliaires ou des enroulements auxiliaires destinés à neutraliser aussi la tension de réactance doit être de 10 à 30 % plus grand.

Figure 123 : moteur de 200 chevaux, 650 tours.

Un transformateur à partie mobile de la Société Alsacienne, survoltant entre 0 et $\pm$ 40 volts, et établi pour du courant de fréquence 50, une intensité de 400 ampères, et une différence de potentiel primaire de 360 volts, a un diamètre de 600 mm. à l'entrefer, et une longueur axiale de fer de 600 mm. Le primaire et le secondaire portent un enroulement en barres avec un grand nombre d'encoches.

Un transformateur tétrapolaire à partie mobile de 2 kw. de l'Union E. G., établi pour une fréquence de 50 périodes et pour 500 volts au primaire, a un diamètre de 255 mm. à l'entrefer et une longueur axiale de 80 mm.

Au lieu de l'expression $P = C. d^2 l. u$, Heubach emploie l'expression

$$d = C_2 \sqrt[3,5]{\frac{\overline{736P}}{u. \frac{l}{d}}}.$$

Digitized by Google

On peut poser $\frac{l}{d} = \frac{\pi}{2p}$. La valeur de C_2 dépend de B_t et de $\frac{p}{\tau}$ ainsi que de u. Heubach pose $C_2 = 15$.

Par exemple, pour un moteur série de 6 chevaux, 1.000 tours, 110 volts, 50 périodes, 4 pôles, Heubach prend

$d = 250$ mm.
$l = 190$ mm.
$\frac{p}{\tau} = \frac{2}{3}$
Induction maxima dans l'air = 5000
$\delta = 0{,}75$ mm.
Diamètre du collecteur 200 mm.
Nombre de lames 132
Enroulement imbriqué double ($a = 2p$)
Nombre d'encoches 66
Nombre de conducteurs par encoche, 16 conducteurs de 1,8 mm. de diamètre.

Nombre d'ampère-tours de l'enroulement compensateur	2/3 des ampère-tours de l'induit
Nombre total de conducteurs de l'enroulement compensateur	88
Nombre de conducteurs sur l'inducteur	30
Nombre de conducteurs sur l'induit en court-circuit	$Z'_a = 132$
Nombre total sur l'induit	$Z_a = 2aZ'_a = 132 \times 8$
Nombre de lignes de balais	4
Nombre de balais par ligne	2 balais de 4×50^{mm}
Rendement	$\eta = 80\,\%$
Facteur de puissance	$\cos \varphi = 0{,}9$.

Digitized by Google

Digitized by Google

TABLE DES MATIÈRES

	Pages
CHAPITRE PREMIER. — *Généralités*	1
Historique	1
Différents types de moteurs monophasés à collecteur	4
Moteurs polyphasés à collecteur	16
Généralités sur les moteurs monophasés à collecteur	20
CHAPITRE II. — *Théorie de la commutation et diagrammes exacts des moteurs monophasés à collecteur*	23
Diagramme général	23
Couple	44
Commutation et production d'étincelles	48
Facteur de puissance	58
Démarrage	59
Réglage de la vitesse	67
Freinage	68
Commutation dans les différents moteurs	72
CHAPITRE III. — *Détails de construction*	89
Généralités sur la construction des moteurs à collecteur : moteurs à courants alternatifs et continu	89
Détails de construction de quelques moteurs actuellement en service	93
Avant-projet de moteur monophasé	123

Digitized by Google

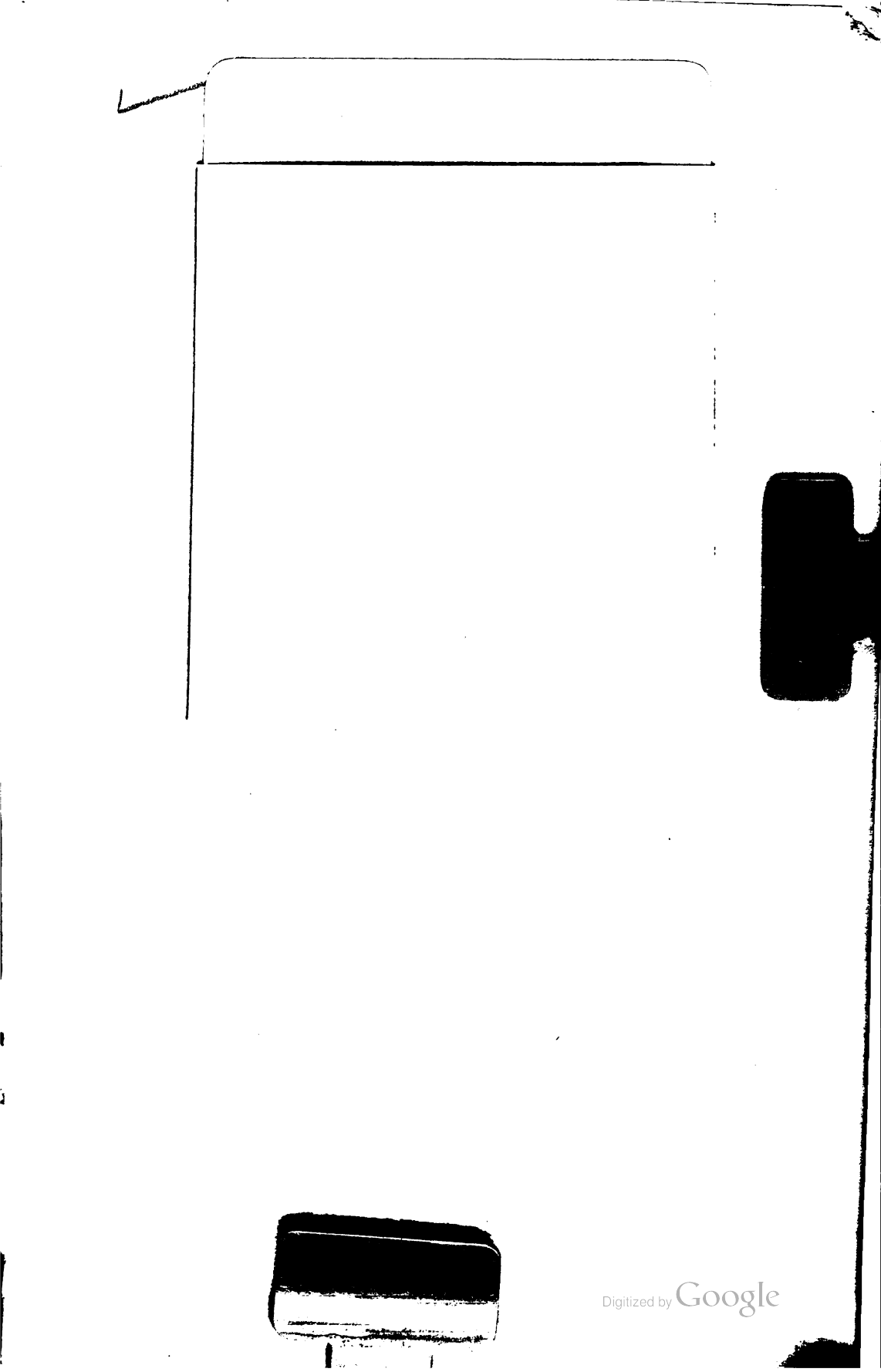
SENS. — SOCIÉTÉ NOUVELLE DE L'IMPRIMERIE MIRIAM, 1, RUE DE LA BERTAUCHE

Digitized by Google

Digitized by Google

89089713473
B89089713473A

Digitized by Google


Digitized by Google

b89089713473
b89089713473a

Digitized by Google